



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SERGIPE  
PRÓ-REITORIA DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

ANÁLISE COMPARATIVA DO COMPORTAMENTO MECÂNICO DE CONCRETO  
ASFÁLTICO USANDO LIGANTE MODIFICADO POR VIA SECA E POR VIA ÚMIDA  
COM MISTURA DE RESÍDUO INDUSTRIAL: BORRACHA DE RECAUCHUTAGEM  
DE PNEUS E BORRA OLEOSA DE PETRÓLEO.

Mandarlan Hallei Nascimento Pereira

São Cristóvão  
2020

**MANDARLAN HALLEI NASCIMENTO PEREIRA**

**ANÁLISE COMPARATIVA DO COMPORTAMENTO MECÂNICO DE CONCRETO  
ASFÁLTICO USANDO LIGANTE MODIFICADO POR VIA SECA E POR VIA ÚMIDA  
COM MISTURA DE RESÍDUO INDUSTRIAL: BORRACHA DE RECAUCHUTAGEM  
DE PNEUS E BORRA OLEOSA DE PETRÓLEO.**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-  
Graduação em Engenharia Civil como requisito  
parcial à obtenção do título de MESTRE EM  
ENGENHARIA CIVIL.

Orientadora: Dra. Gisélia Cardoso

Coorientador: DSc. Erinaldo Hilário Cavalcante

São Cristóvão

2020

MANDARLAN HALLEI NASCIMENTO PEREIRA

ANÁLISE COMPARATIVA DO COMPORTAMENTO MECÂNICO DE CONCRETO  
ASFÁLTICO USANDO LIGANTE MODIFICADO POR VIA SECA E POR VIA ÚMIDA  
COM MISTURA DE RESÍDUO INDUSTRIAL: BORRACHA DE RECAUCHUTAGEM  
DE PNEUS E BORRA OLEOSA DE PETRÓLEO.

DISSERTAÇÃO APRESENTADA AO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM  
ENGENHARIA CIVIL DA UNIVERSIDADE FEDERAL DE SERGIPE EM \_\_\_\_/\_\_\_\_/\_\_\_\_

BANCA EXAMINADORA:

Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Gisélia Cardoso  
Orientadora (PROEC/UFS)

Prof. Dr. Erinaldo Hilário Cavalcante  
Coorientador (PROEC/UFS)

Prof. Dr. Guilherme Bravo de Oliveira Almeida  
Examinador interno (PROEC/UFS)

Prof. Dr. Herbet Alves de Oliveira  
Examinador externo (IFS/ Campus Estância)

São Cristóvão

2020

## DEDICATÓRIA

*Aos meus pais Messias e Daniva que não  
tiveram a mesma oportunidade de estudar  
e concluíram apenas o ensino fundamental,  
mas sempre incentivaram os meus estudos  
como também a realização desse mestrado.*

## AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a DEUS e consagro a ele esse título de mestre. Deus jorrou sobre mim a força do Espírito Santo e me capacitou. É dele a minha força e minha esperança para os momentos de aflições, mas para que eu renovasse minhas forças sempre foi necessário adorar muitas vezes Jesus no Sacrário, afinal “Eu sei em quem coloquei minha confiança” 2 Tm 1,12. Agradeço a intercessão da minha mãe do céu a imaculada Nossa Senhora muitas vezes advogada que venceu por mim várias causas durante esse mestrado.

Aos meus pais amados Messias e Daniva por todo apoio em prol dos meus estudos, incentivo, compreensão nos momentos de ausência e cuidado diário durante essa longa jornada acadêmica.

A minha irmã querida Natanna que sempre se mostra prestativa e companheira nos momentos que mais preciso.

Ao meu namorado e grande amigo Gabriel por toda ajuda e apoio sincero para conclusão desse trabalho, mas principalmente por me proporcionar durante essa pesquisa alegrias e momentos imensuráveis.

As minhas amigas do IFS Adriana, Suellen Regina e Suellen Caroline por todo suporte nas minhas ausências para que assim fosse possível a realização dessa pesquisa. Em especial a Adriana pela amizade e apoio de sempre.

A minha amiga Gilmária pela torcida sincera e orações.

Ao IFS Campus Estância por me conceder a oportunidade de afastamento parcial para o mestrado.

À minha orientadora, professora Dra. Gisélia Cardoso, por todos os ensinamentos dispensados à mim e pela dedicação para a conclusão da minha pesquisa.

Ao meu coorientador, professor DSc. Erinaldo Hilário Cavalcante.

Aos professores Guilherme Bravo e Marcelo Massayoshi pelas contribuições na banca de qualificação.

Ao professor do IFS Herbet Alves por aceitar o convite para compor banca de defesa.

Aos colegas do DEQ Denes e Rosiane que me apoiaram na realização de diversos ensaios.

À professora Dra. Lêda Christiane Lucena pela autorização dos ensaios Superpave realizados no Laboratório de Engenharia de Pavimentos (LEP) da Universidade Federal de Campina Grande (UFCG).

Aos colegas da UFCG Ablenya, Daniel e Christian por toda presteza durante a realização dos ensaios realizados no LEP da UFCG, como também pelos muitos conhecimentos compartilhados.

Aos técnicos da UFS Willami e Luiza pelo apoio no laboratório de Mecânica dos Solos do Departamento de Engenharia Civil da UFS, nos diversos ensaios realizados.

À empresa EMURB, na pessoa do Sr. Antônio, pela prontidão na disponibilização de agregados e do ligante asfáltico CAP 50/70, para realização dessa pesquisa.

## RESUMO

A camada de revestimento asfáltico dos pavimentos rodoviários tem a função de resistir diretamente às ações do tráfego e transmiti-las de forma atenuada às camadas inferiores, impermeabilizar o pavimento, além de melhorar as condições de rolamento proporcionando aos usuários segurança e conforto. Na construção das rodovias o material empregado nos revestimentos dos pavimentos é o concreto asfáltico usinado a quente ou a frio. No Brasil, o mais empregado é o concreto asfáltico usinado a quente (CAUQ), cuja aglutinação dos agregados é feita por meio do ligante asfáltico em proporções pré-definidas. Nos dias atuais, o elevado tráfego de veículos nas rodovias e a diversidade climática, ocasionam a perda da qualidade funcional e estrutural do revestimento de pavimento. Daí, cada vez mais são desenvolvidas pesquisas sobre o aumento da resistência e da durabilidade dos materiais que compõem o revestimento do pavimento, através do uso de resíduos industriais como materiais constituintes de CAUQ. A utilização de resíduos industriais no concreto asfáltico oportuniza a estes novas destinações, reduz a extração de recursos naturais e adequa o desempenho do revestimento de pavimento rodoviário às atuais condições de uso. O objetivo do presente estudo foi produzir concreto asfáltico tipo CAUQ em laboratório, pelo processo de via seca, com 10% do CAP 50/70 modificado com mistura dos resíduos industriais, borra oleosa de petróleo e borracha de pneus, nas concentrações de 85/15% (M1) e comparar o seu desempenho mecânico com o CAUQ com 10% do CAP 50/70 modificado com as mesmas concentrações dos resíduos industriais pelo processo de via úmida, ambos dosados pelo método Marshall e Superpave. Os resultados dos ensaios mecânicos de resistência à tração por compressão diametral, módulo de resiliência e dano por umidade induzida de corpos de prova dosados pelo método Marshall e Superpave, mostraram que as misturas asfálticas modificadas pelo processo via seca apresentam comportamento mecânico acima do limite mínimo recomendado pela norma 031/2006 do DNIT, indicando ser viável o processo via seca no uso de resíduos industriais de borra oleosa de petróleo e borracha de pneus inservíveis na modificação de ligante asfáltico além do referido processo evitar o seu envelhecimento por reaquecimento, apresentar melhor controle da temperatura, maior praticidade e superar o problema de separação de fases.

**PALAVRAS-CHAVE:** concreto asfáltico, ligante asfáltico modificado, resíduo industrial, comportamento mecânico.

## ABSTRACT

The asphalt coating layer of road pavements has the function of directly resisting the actions of traffic and transmitting them in an attenuated manner to the lower layers, waterproofing the pavement, in addition to improving the rolling conditions providing users with safety and comfort. In the highways construction, the material used in the floor coverings is hot or cold asphalt concrete. In Brazil, the most applied is hot-machined asphalt concrete (CAUQ), whose aggregates are agglutinated using pre-defined proportions of asphalt binder. Nowadays, the high traffic of vehicles on the highways and the climatic diversity, cause the loss of the functional and structural quality of the pavement. Hence, more and more research is being developed on increasing the strength and durability of the materials that make up the floor covering, through the use of industrial waste as constituent materials of CAUQ. The use of industrial waste in asphalt concrete makes these new destinations possible, reduces the extraction of natural resources and adapts the performance of the road pavement to the current conditions of use. The objective of the present study was to produce CAUQ-type asphalt concrete in laboratory, throughout the dry process, with 10% of the CAP 50/70 modified with a mixture of industrial residues, oil sludge and tire rubber, in concentrations of 85/15 % (M1) and compare its mechanical performance with the CAUQ with 10% of the CAP 50/70 modified with the same concentrations of industrial waste by the wet process, both dosed by the Marshall and Superpave method. The results of the mechanical tests of tensile strength by diametrical compression, resilience module and moisture damage induced by specimens measured by the Marshall and Superpave method, showed that asphalt mixtures modified by the dry process present mechanical behavior above the recommended minimum limit. by DNIT standard 031/2006, indicating that the dry process is viable in the use of industrial residues of oily oil sludge and tire rubber that are not usable in the modification of asphalt binder, in addition to the aforementioned process to prevent their aging by reheating, to present a better control of the temperature, greater practicality and overcome the problem of phase separation.

**KEYWORDS:** asphalt concrete, modified asphalt binder, industrial waste, mechanical behavior.



## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Faixas Granulométricas recomendadas pelo DNIT para composição de concreto asfáltico.....	35
Tabela 2 – Parâmetros volumétricos e de resistência à tração por compressão diametral (RTCD) para cada tipo de camada de rolamento .....	38
Tabela 3 – Resultado do módulo de resiliência (MR) de misturas asfálticas com CAP-20.....	43
Tabela 4 - Temperaturas de processamento da mistura.....	60
Tabela 5 - Parâmetros volumétricos adotados para dosagem Superpave .....	62
Tabela 6 – Resultados dos ensaios de massa específica e absorção de água dos agregados ....	75
Tabela 7 - Resultados do ensaio de abrasão Los Angeles .....	76
Tabela 8 - Resultados da caracterização do CAP 50/70.....	76
Tabela 9 - Caracterização reológica do CAP 50/70 puro .....	77
Tabela 10- Parâmetros volumétricos das dosagens, norma DNIT 031/2006, por via seca e via úmida .....	78
Tabela 11 - Valores de estabilidade Marshall das misturas asfálticas com CAP 50/70 modificado com M1 pelo processo via seca.....	98
Tabela 12 - Valores de RTCD das misturas asfálticas com CAP 50/70 modificado com M1 pelo processo via seca.....	98
Tabela 13 - Valores de MR das misturas asfálticas com CAP 50/70 modificado com M1 pelo processo via seca .....	99

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Representação esquemática de estrutura do pavimento rodoviário .....	19
Figura 2 - Borra oleosa de petróleo .....	23
Figura 3 - Representação esquemática de obtenção de CAUQ por via seca.....	27
Figura 4 - Representação esquemática de obtenção de ligante asfáltico modificado por via úmida .....	29
Figura 5 - Compactador Marshall do GEOPAV/DEC/UFS .....	37
Figura 6 - Esquema de ensaio de compressão diametral .....	40
Figura 7 - Resultados da resistência à tração por compressão diametral (RTCD) de mistura asfáltica com CAP 50/70 sem e com modificação, por via úmida, com 10% de M1 .....	41
Figura 8 – Resultados do ensaio de módulo de resiliência de mistura asfáltica com ligante modificado com resíduo industrial M1.....	44
Figura 9 - Resultados do ensaio de RRT de misturas asfálticas com ligante modificado com polímeros S74, SX500 e PPA116.....	46
Figura 10 - Resultados do ensaio de RRT de misturas asfálticas com CAP 50/70 modificado com fibras de bananeira.....	47
Figura 11 - Fluxograma do procedimento de caracterização dos materiais, dosagem e dos ensaios mecânicos realizados .....	49
Figura 12 - Ensaio de penetração do CAP puro .....	51
Figura 13 - Agregados graúdo, intermediário e pó de pedra (fíler).....	52
Figura 14 - Determinação da massa específica real do .....	54
Figura 15- Determinação do índice de forma.....	55
Figura 16 - Equipamento Los Angeles e esferas abrasivas .....	56
Figura 17 - Equipamento de medida do ponto de amolecimento de ligante .....	57
Figura 18 - Ensaio de adesividade.....	58
Figura 19- Determinação do Gmm densidade máxima medida a) Eliminação de ar pela aplicação de vácuo b) mistura asfáltica após a desestruturação dos grumos .....	61

Figura 20 - Confeção dos corpos de prova: a) adição de ligante ao agregado b) mistura c) colocação no molde Superpave d) e e) Compactação f) Corpos de prova .....	63
Figura 21 – Determinação do teor de CAP 50/70 modificado com M1 para dosagem Marshall .....	66
Figura 22 – Determinação do teor de CAP 50/70 modificado com M1 para dosagem Superpave .....	67
Figura 23 - Ensaio de estabilidade Marshall .....	68
Figura 24 - Ensaio de resistência à tração por compressão diametral .....	69
Figura 25 - Ensaio de dano por umidade induzida: a) saturação dos corpos de prova; b) colocação dos corpos de prova em sacos plásticos; c) acondicionamento em -18°C; d) acondicionamento a 60°C.....	71
Figura 26 - Ensaio módulo de resiliência .....	72
Figura 27 - Curva granulométrica dos agregados utilizados na mistura asfáltica modificada com M1 pelo processo via seca .....	73
Figura 28 - Curva adotada e os limites da faixa C do DNIT e especificações do Superpave para a mistura asfáltica modificada com M1 pelo processo via seca .....	74
Figura 29 - Ensaio de adesividade. a) Via úmida Santana (2015); b) Via seca.....	77
Figura 30 - Determinação do teor de CAP 50/70 modificado com M1 pelo processo via seca .....	78
Figura 31- Determinação do teor de CAP 50/70 modificado com M1 pelo processo via seca .....	79
Figura 32 – Resultados de estabilidade Marshall e Superpave de misturas asfálticas com ligante modificado pelo processo via úmida e pelo processo via seca.....	80
Figura 33 - Resultados de resistência à tração por compressão diametral de misturas asfálticas com ligante modificado pelo processo via úmida e pelo processo via seca.....	82
Figura 34 - Resultados de módulo de resiliência de misturas asfálticas com ligante modificado pelo processo via úmida e pelo processo via seca .....	83
Figura 35 - Resultados de RRT de misturas asfálticas com ligante modificado pelo processo via úmida e pelo processo via seca.....	84

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANP - Agência Nacional de Transporte

CNT – Confederação Nacional de Transporte

CAP - Cimento Asfáltico de Petróleo

CM1N1 – CAP 50/70 modificado por 10% m/m de M1

CAUQ - Concreto Asfáltico Usinado a Quente

DENATRAM - Departamento Nacional de Trânsito

DSR – *Dynamic Shear Rheometer*

DMT – Densidade Máxima Teórica

Gb - massa específica do ligante ( $\text{g/cm}^3$ )

Gmb - massa específica aparente do corpo de prova ( $\text{g/cm}^3$ )

Gmm - Densidade Máxima Medida

Gsb - massa específica aparente dos agregados ( $\text{g/cm}^3$ )

Gse - massa específica aparente dos agregados ( $\text{g/cm}^3$ )

DNIT - Departamento Nacional de Infraestrutura de Transporte

M1- Resíduo industrial - 85% de borra oleosa de petróleo e 15% de borracha de pneu

MR – Módulo de Resiliência

NPA - Neutro Pesado Aromático

Pb - porcentagem de ligante na mistura (%)

Pba - porcentagem de ligante absorvido (%)

Pbe - Porcentagem efetiva de ligante (%)

Ps - Porcentagem de agregado na mistura (%)

P200 - porcentagem de agregado que passa na peneira n°. 200

RBV – Relação Betumes/Vazios

RTCD – Resistência à tração por compressão diametral

RT – Resistência à tração

VAM – Vazios do Agregado Mineral

Vv – Volume de Vazios

%Gmm@N - Percentual da densidade do corpo de prova compactado com N giros em relação a densidade máxima da mistura asfáltica solta.

## SUMÁRIO

<b>LISTA DE TABELAS .....</b>	<b>viii</b>
<b>LISTA DE FIGURAS.....</b>	<b>ix</b>
<b>LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS .....</b>	<b>xi</b>
<b>1 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>14</b>
1.1 JUSTIFICATIVA .....	16
1.2 OBJETIVO GERAL .....	17
1.3 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	18
<b>2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>	<b>19</b>
2.1 Revestimento Asfáltico .....	19
2.2 Resíduo industrial.....	21
2.2.1 Borra oleosa de petróleo.....	23
2.2.2 Borracha de recauchutagem de pneus.....	24
2.3 Ligante Asfáltico Modificado .....	25
2.3.1 Ligante asfáltico modificado por via seca .....	27
2.3.2 Ligante asfáltico modificado por via úmida.....	27
2.4 Comportamento mecânico das misturas asfálticas.....	31
2.5 Caracterização de ligante asfáltico modificado .....	32
2.6 Mistura asfáltica com ligante modificado .....	32
2.6.1 Agregados em mistura asfáltica .....	33
2.6.2 Determinação do teor de ligante de projeto .....	36
2.6.3 Dosagem de ligante em misturas asfálticas .....	36
A - Dosagem Marshall.....	36
B - Dosagem Superpave .....	38
2.6.4 Ensaio mecânico de misturas asfálticas - Métodos de Ensaio .....	39
A – Ensaio de resistência à tração por compressão diametral .....	36
B – Módulo de resiliência.....	41
C – Danos por umidade induzida - Lottman.....	44
<b>3 MATERIAIS E MÉTODOS .....</b>	<b>48</b>
3.1 MATERIAIS .....	48
3.2 MÉTODOS.....	48
3.2.1 Caracterização dos materiais .....	50
A - Caracterização física .....	50

<b>B - Caracterização físico - química do CAP 50/70.....</b>	<b>56</b>
<b>C – Caracterização química.....</b>	<b>58</b>
<b>D - Dosagens das misturas asfálticas com CAP 50/70 modificado com M1 pelo processo via seca .....</b>	<b>58</b>
<b>E - Determinação do teor do CAP 50/70 modificado com M1 pelo processo de via úmida de Santana (2015) .....</b>	<b>66</b>
<b>3.3 ENSAIOS MECÂNICOS.....</b>	<b>67</b>
<b>4 RESULTADOS E DISCUSSÕES .....</b>	<b>73</b>
<b>4.1 CARACTERIZAÇÕES FÍSICAS.....</b>	<b>73</b>
<b>4.1.1 Análise granulométrica .....</b>	<b>73</b>
<b>4.1.2 Massa específica dos agregados.....</b>	<b>74</b>
<b>4.1.3 Índice de forma .....</b>	<b>75</b>
<b>4.1.4 Abrasão Los Angeles .....</b>	<b>75</b>
<b>4.1.5 Caracterização do CAP 50/70.....</b>	<b>76</b>
<b>4.2 CARACTERIZAÇÃO QUÍMICA.....</b>	<b>76</b>
<b>4.2.1 Adesividade .....</b>	<b>76</b>
<b>4.2.2 Caracterização reológica em temperaturas de processamento .....</b>	<b>77</b>
<b>4.3 DETERMINAÇÃO DO TEOR DO CAP 50/70 MODIFICADO COM M1 PELO PROCESSO DE VIA SECA .....</b>	<b>78</b>
<i>Dosagem Marshall.....</i>	<i>79</i>
<i>Dosagem Superpave .....</i>	<i>79</i>
<b>4.4 ENSAIOS MECÂNICOS.....</b>	<b>79</b>
<i>Estabilidade Marshall.....</i>	<i>79</i>
<i>Resistência à tração por compressão diametral .....</i>	<i>80</i>
<i>Módulo de resiliência .....</i>	<i>82</i>
<i>Lottman .....</i>	<i>83</i>
<b>5 CONCLUSÕES.....</b>	<b>86</b>
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>88</b>
<b>APÊNDICE .....</b>	<b>98</b>

## 1 INTRODUÇÃO

O desenvolvimento sustentável é amplamente discutido, no mundo atual, devido à necessidade do uso racional dos recursos naturais. Uma das formas de fazê-lo é por meio do reaproveitamento de resíduos e de sua alocação de forma correta quanto ao aspecto da sustentabilidade (NOHARA et al. 2006). Apesar das indústrias buscarem de modo geral melhorar o sistema da qualidade de produção para redução de resíduos descartados ao meio ambiente, há questões que impossibilitam de eliminá-los por completo. Diante disso, cada vez mais a prática sustentável de reciclar e do uso de resíduos vem se efetivando (GRAÇA, CARDOSO E CAVALCANTE, 2016).

A indústria da construção civil é um segmento importante do setor econômico de um país devido à sua contribuição no produto interno bruto e forte relação com os setores industriais. Contudo, é responsável também pelo alto consumo de recursos naturais. Constata-se que na construção das rodovias brasileiras o material mais utilizado no revestimento do pavimento é o concreto asfáltico, também denominado como concreto asfáltico usinado a quente (CAUQ) que consiste em uma mistura de agregados minerais de diversos tamanhos aglutinados com ligante asfáltico.

O agregado mineral utilizado em misturas asfálticas tem elevada contribuição para propriedades mecânicas e para a estrutura do esqueleto mineral. Essa mistura tem a função de resistir às cargas advindas do tráfego. Contudo, as propriedades das misturas dependem da granulometria dos agregados (grãos e miúdos), do tipo de finos (fíler), da relação de vazios e da proporção de ligante asfáltico (BERNUCCI et al. 2006).

A demanda do transporte rodoviário leva à patologia recorrente no concreto asfáltico de seu revestimento o que torna necessário pesquisar formas de melhorar a resistência dos materiais utilizados na sua composição e propriedades mecânicas e, dessa forma, prolongar o seu tempo de vida útil. Segundo Bernucci et al. (2006) os principais defeitos dos concretos de revestimento rodoviário nos pavimentos brasileiros são trincamento por fadiga e deformação permanente.

O comportamento viscoelástico do ligante nas condições de uso no concreto asfáltico é responsável por controlar o desempenho de uma via. O uso da borracha de pneus assim como outros modificadores do ligante asfáltico tem por finalidade a melhoria dos parâmetros de desempenho dos concretos asfálticos de revestimento do pavimento. Yu, H.; Leng, L.; Gao, Z.

(2016) afirmaram que borrachas de pneus inservíveis são resíduos gerados em grande quantidade, que causam danos ao meio ambiente, o que torna, com sucesso, justificável a realização de estudo sobre a sua reutilização como agente de modificação de ligante para uso em misturas asfálticas de revestimento de pavimento.

Segundo Bernucci et al. (2006), no processo de obtenção de concreto asfáltico por via seca, os modificadores entram como parte do agregado pétreo da mistura sendo adicionados diretamente no misturador da usina de asfalto e juntamente com o ligante asfáltico dá origem ao produto concreto asfáltico modificado. A granulometria normalmente é a mesma que a utilizada em misturas convencionais. Entretanto, temperaturas maiores são necessárias para a mistura (160°C- 180°C) e para compactação (148°C-160°C).

A maior parte da malha viária do Brasil é construída de pavimentos flexíveis que apresentam defeitos e como consequência reduz a sua vida útil. Esta é causada por alto fluxo de veículos, o que requer construção do pavimento e concreto asfáltico para o seu revestimento com especificações mais altas em termos de capacidade de carga exigindo materiais que aumentem a capacidade de carga do pavimento. Outro problema relacionado aos pavimentos rodoviários defeituosos são os casos de acidentes devido às manobras necessárias que os motoristas têm que fazer para evitar o grande número de buracos, bem como danos contínuos aos veículos.

O uso de asfalto modificado em pavimento rodoviária avançou nos últimos anos e devido aos benefícios do uso desse tipo de asfalto está sendo cada vez mais utilizado (PRESTI, 2013). Dessa maneira, entende-se mundialmente que o asfalto modificado pode ser uma alternativa para melhorar a vida útil dos pavimentos e, assim, encontrar melhor desempenho que permita prolongar a sua duração.

O descarte inapropriado de resíduos industriais causa grandes danos ambientais. Dessa maneira, a viabilidade de uso desses resíduos como material constituinte de mistura asfáltica pode ocasionar benefícios à mistura, possibilita a redução na extração de recursos minerais, viabiliza nova destinação para os resíduos industriais, além do benefício ambiental em retirar esses resíduos da natureza.

A borra oleosa de petróleo é um resíduo advindo da indústria de petróleo constituído de mistura multifásica de compostos emulsificados água/óleo + sólidos (orgânicos e inorgânicos) + tensoativos (naturais e sintéticos) resultantes de floculações favorecidas pela presença de sólidos, como por exemplo, as geradas nos processos de tratamento primário de petróleo no



campo e nas refinarias. É o mais significativo resíduo sólido da indústria de petróleo, tanto pela sua natureza quanto pela sua quantidade gerada (JASMINE J.; MUKHERJI, S. (2015); WANG, R.; et. al., (2018), HU, G.; LI, J.; ZENG, G. (2013).

Neste projeto, foram produzidas em bancada de laboratório misturas com ligante asfáltico modificado pelo processo de via seca com incorporação dos resíduos industriais borracha de recauchutagem de pneus e borra oleosa de petróleo. As misturas dos dois resíduos industriais foram nas proporções de 85% de borra oleosa de petróleo e 15% de borracha de pneus, essa mistura de resíduos foi denominada de M1. Os resultados de caracterização mecânica das misturas asfálticas modificadas com M1 pelo processo via seca foram comparados com os resultados das misturas asfálticas modificadas com M1 pelo processo via úmida obtidos pelo grupo de pesquisa GPDCMat, integrante do PROEC com o objetivo de avaliar o comportamento mecânico de concreto asfáltico de ligante modificado por via seca dosados pelo método Marshall e Superior Performing Asphalt Pavements (Superpave).

## **1.1 JUSTIFICATIVA**

O Grupo de Pesquisa em Desenvolvimento e Caracterização de Materiais (GPDCMat), integrante do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil (PROEC), tem desenvolvido nos últimos 10 anos estudos de ligante modificado com resíduo industrial: borracha de recauchutagem de pneus e borra oleosa (GRAÇA, CARDOSO e CAVALCANTE, 2011; SANTANA, 2015; GRAÇA, CARDOSO e CAVALCANTE, 2015; SANTANA et al. 2018).

Este trabalho é uma análise comparativa ao estudo realizado por Santana (2015), um dos integrantes do Grupo de Pesquisa em Desenvolvimento e Caracterização de Materiais (GPDCMat), que avaliou a incorporação dos resíduos de borracha de pneus e borra oleosa de petróleo por processo de via úmida. Devido às dificuldades observadas pelo processo de via úmida, como o surgimento de separação de fases, o envelhecimento através do reaquecimento do ligante e o difícil controle da temperatura, este estudo propôs avaliar a influência desses resíduos modificadores no desempenho asfáltico por processo de via seca. Portanto, foram mantidos os mesmos teores de resíduos utilizados por Santana (2015) e apenas o processo de incorporação desses materiais modificadores foi diferente.

Nos estudos realizados por Santana et al. (2018) houve melhora quanto a estabilidade de estocagem do ligante modificado e adesividade ao agregado somente quando adicionado o óleo extensor Neutro Pesado Aromático - NPA. Nas pesquisas de Graça, Cardoso e Cavalcante (2015) foi observado o problema do surgimento de separação de fase no ligante modificado. Para as análises de comportamento mecânico nas pesquisas de Santana (2015) com ligante modificado, corpos de prova dosados pelo método Marshall e Superpave mostraram resultados com limites mínimos superiores aos exigidos pela norma 031/2006 do DNIT.

Este projeto buscou estudar as condições de interação entre o ligante asfáltico e os resíduos modificantes: borracha de recauchutagem de pneus e borra oleosa de petróleo no processo de obtenção de concretos asfálticos, por via seca, e comparar o desempenho mecânico com o obtido por via úmida estudado pelo GPDCMat/UFS. Este estudo foi realizado para tentar superar as dificuldades advindas do processo realizado por via úmida, como a separação de fases, controle da temperatura durante o processo de modificação e instabilidade de separação de fases durante o período de estocagem. As dificuldades que ocorrem no processo por via úmida afetam o comportamento reológico do ligante asfáltico modificado, a dosagem do concreto asfáltico modificado e consequentemente o seu desempenho mecânico.

Geralmente são usados dois métodos de incorporação de modificantes de ligante: via úmida e via seca. O primeiro método envolve a pré-mistura dos modificantes ao ligante o qual exige um procedimento industrial para tal; o segundo método, é um processo que introduz diretamente os modificantes no misturador, juntamente com os agregados aquecidos, ficando estes com uma viscosidade adequada para se misturar ao ligante, adicionado posteriormente.

Uma mistura dosada pelo processo por via seca apresenta algumas vantagens como maior praticidade, já que os modificantes e agregados se tornam materiais da mistura facilitando o seu manuseio, controle da temperatura, possibilidade de obter uma massa mais homogênea e superação da instabilidade do ligante asfáltico modificado durante a estocagem, sendo este um problema frequente no processo por via úmida.

## **1.2 OBJETIVO GERAL**

Estudar o comportamento mecânico de concreto asfáltico usinado a quente (CAUQ) na presença de ligante asfáltico modificado por via seca com resíduos industriais: borracha de recauchutagem de pneus e borra oleosa de petróleo, e comparar o seu desempenho mecânico com CAUQ de ligante asfáltico modificado por via úmida com os mesmos resíduos industriais obtido em estudo realizado no LDCMat/UFS.

### **1.3 OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

Para atingir o objetivo geral, o presente estudo foi subdividido nos seguintes objetivos específicos:

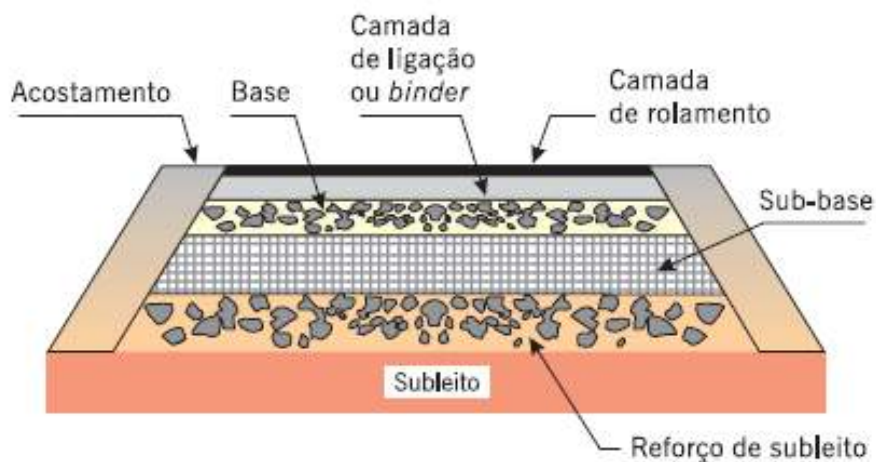
- Caracterizar os materiais constituintes da mistura de ligante asfáltico modificado por via seca com borra oleosa e borracha de recauchutagem de pneus;
- Estudar composição de agregados minerais para a obtenção de CAUQ processado com mistura de ligante asfáltico modificado por via seca;
- Utilizar para a obtenção de CAUQ processado com ligante asfáltico modificado por via seca o mesmo teor de projeto de ligante asfáltico modificado por via úmida para a dosagem Marshall e dosagem Superpave;
- Produzir corpos de prova de CAUQ processado com ligante asfáltico modificado por via seca;
- Avaliar o desempenho mecânico de CAUQ processado com ligante asfáltico modificado por via seca com mistura de borra oleosa e borracha de recauchutagem de pneus;
- Comparar o comportamento mecânico do CAUQ processado com ligante asfáltico modificado por via seca com o modificado por via úmida obtido pelo Grupo de Pesquisa em Desenvolvimento e Caracterização de Materiais da Universidade Federal de Sergipe (GPDCMat/UFS) e com outros agentes modificantes disponíveis na literatura;
- Levantar possíveis fatores que afetam o comportamento mecânico do concreto asfáltico processado com ligante modificado com resíduos industriais;
- Identificar as possíveis vantagens do uso do ligante asfáltico modificado com os resíduos industriais em estudo por via seca no comportamento de CAUQ.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 Revestimento Asfáltico

O revestimento asfáltico é a última camada da estrutura que se encontra diretamente exposta à carga dos veículos e aos fatores climáticos (Figura 1). É constituída pela mistura de agregados minerais de granulometria variada e o ligante asfáltico que, após executada, deve apresentar características como estabilidade, durabilidade e flexibilidade diante de condições diversas de tráfego e clima do local. Bernucci et al. (2006) afirmaram que em torno de 95% das rodovias brasileiras pavimentadas apresentam revestimento asfáltico e o concreto asfáltico usinado a quente (CAUQ) é o tipo de revestimento asfáltico mais utilizado no Brasil.

Figura 1 - Representação esquemática de estrutura do pavimento rodoviário com revestimento asfáltico



Fonte: Bernucci et al. (2006)

Especificado pela norma 031/2006 do Departamento Nacional de Infraestrutura (DNIT), o CAUQ é definido como uma mistura produzida de agregados graúdos, miúdos e se necessário, material de enchimento ou fíler aglutinado com o ligante asfáltico. A compactação dessa mistura é realizada a elevadas temperaturas e todos estes materiais devem atender às especificações do órgão.

O CAUQ precisa apresentar composição granulométrica compatível com a função e utilização do pavimento, e o ligante asfáltico tem como função garantir o seu comportamento

viscoelástico quando em uso e proporcionar a aderência entre os agregados. Existem três tipos de CAUQ: concreto asfáltico usinado a quente; concreto asfáltico usinado a frio e concreto asfáltico morno.

O concreto asfáltico, quando processado a altas temperaturas, é conhecido como concreto asfáltico usinado a quente (CAUQ) um dos tipos de mistura asfáltica mais empregada no Brasil (BERNUCCI et al. 2006). O CAUQ é composto pela mistura de agregados minerais e ligante asfáltico. Para o seu bom desempenho é importante analisar as propriedades individuais dos componentes da mistura (MENDES E MARQUES, 2012) e deve apresentar bom comportamento quanto às propriedades como estabilidade, flexibilidade e durabilidade (BERNUCCI et al. 2006).

Pinto e Preussler (2002) afirmaram que os principais concretos asfálticos usinados a quente utilizados nas rodovias são o concreto asfáltico denso, Camada Porosa de Atrito (CPA) e Stone Matrix Asphalt (SMA). O concreto asfáltico denso é definido como uma mistura bastante resistente, porém os materiais tem que ser selecionados e dosados adequadamente (BERNUCCI et al. 2006). Nesse tipo de mistura os agregados tem graduação densa e bem graduada. A quantidade de ligante asfáltico não pode ser muito elevada, pois o objetivo é formar uma mistura com número de vazios para cada camada de revestimento asfáltico em torno de 3% a 5% após a compactação. Além disso, quando não é deixado o volume de vazios recomendado, eles perdem estabilidade quanto ao tráfego e acabam deformando-se por fluência.

O CAUQ de mistura asfáltica aberta é conhecido como CPA ou revestimento asfáltico drenante. De acordo com Siqueira et al. (2012), o que define o concreto asfáltico tipo CPA é o teor de ligante, volume de vazios e a granulometria dos agregados. Essa mistura tem elevados vazios de ar em torno de 18% a 24% devido à pequena quantidade de agregado e ligante asfáltico na mistura. Há diversas vantagens pelo uso deste material nas rodovias como diminuição do efeito de aquaplanagem, ou seja, reduz a lâmina de água na superfície da camada de rolamento e melhora a visibilidade noturna, pois funciona como uma camada drenante em dias de chuva.

O CPA também diminui o nível do ruído e eleva a aderência pneu-pavimento (SAINTON, 1990). A mistura asfáltica a quente tipo CPA tem como especificação o DNER-ES 386/99 e recomenda que o teor de ligante seja em torno de 3,5% a 4,5%, a depender das características dos outros componentes da mistura.

O revestimento asfáltico usinado a quente SMA foi desenvolvido na Alemanha e é bastante utilizado nos EUA. Esse revestimento é conhecido por sua elevada durabilidade e resistência já que aumenta a interação entre os agregados. O volume de vazios desse tipo de mistura varia de 4% a 6% e ocorre pela graduação específica com agregados de dimensões maiores. Segundo Bernucci et al. (2006), o teor de ligante no SMA em geral é elevado, em torno de 6,0% e 7,0%. Ao contrário do revestimento tipo CPA, os vazios dessa mistura são preenchidos por mastigue asfáltico, composto por frações de fíler, areia e ligante asfáltico.

Assim como o revestimento CPA, o revestimento SMA também diminui o ruído do tráfego, possui outras vantagens como elevada resistência a rachaduras e ao envelhecimento. Porém, apresenta algumas desvantagens como um custo primário mais elevado e a drenagem do ligante asfáltico, devido a isso são recomendados o uso de fibras ou a modificação do ligante (BEHONED et al. 2012).

O concreto asfáltico usinado a frio é composto pela mistura de agregados minerais em usina apropriada. Empregam-se na sua obtenção emulsões asfálticas como ligante e não há aquecimento prévio dos agregados. O ligante asfáltico pode raramente ser aquecido, mas em geral é utilizado na temperatura ambiente (BERNUCCI et al. 2006). Sales (2015) afirma que as misturas a frio são produzidas na temperatura entre 20° e 50°C e possuem propriedade de durabilidade e resistência inferiores ao concreto asfáltico a quente. Para Motta et al. (2011), o concreto asfáltico usinado a quente possui mais qualidade quando comparado ao concreto a frio, pelo fato de serem aquecidos todos os componentes da mistura. Dessa maneira, durante a homogeneização se mantém a temperatura do ligante alta, evitando que ele se torne viscoelástico. Já o concreto asfáltico morno são misturas de agregados minerais e ligante asfáltico usinado na temperatura intermediária entre as temperaturas das misturas quente e a frio (SALES, 2015).

## 2.2 Resíduo industrial

No que se refere à geração de resíduos, atualmente a elevada produção industrial para atender as necessidades de consumo da sociedade tem apresentado um aumento considerável de sua quantidade e, mesmo que seja possível reduzir essa quantidade durante a produção, os resíduos industriais são sempre gerados. Segundo Freitas (2010), já existe desenvolvimento tecnológico para reciclagem de elevada quantidade e variedade de resíduos, mas pelo fato de

não se apresentarem ambientalmente seguros, torna-se um desafio científico. Relacionado a isso, tem a atual conjuntura político - econômico do Brasil que tem retomado os investimentos em obras de infraestrutura e a construção civil é uma das atividades industriais mais atuantes no que se refere à geração de resíduos. A produção de resíduos ocasionam prejuízos à natureza, além do grande desprendimento energético.

A construção de rodovias consome muita energia e grande quantidade de recursos naturais. Segundo Mota (2011), o setor rodoviário tem se preocupado em contribuir com questões ambientais, visto que para as construções de rodovias devido a elevadas temperaturas também emite gases de efeito estufa. Diante disso, a incorporação de resíduos em obra de pavimentação é uma alternativa para reaproveitar os resíduos excluindo os riscos da sua destinação imprópria, reduzir a exploração de recursos da natureza e, principalmente, melhorar as propriedades mecânicas dos materiais que formam as camadas do pavimento.

De acordo com Graça, Cardoso e Cavalcante (2016) é cada vez mais corrente a utilização de resíduos industriais em novos procedimentos tecnológicos, como também o uso de diversos resíduos em revestimentos do pavimento asfáltico. Freitas (2010) analisou o resíduo de gesso nas propriedades mecânicas do revestimento asfáltico através da metodologia Marshall adicionando 2% e 4% do resíduo entre os agregados, o pesquisador concluiu que o teor de 2% de gesso incorporado à mistura asfáltica foi o único teor que apresentou bom desempenho na mistura asfáltica.

Nos estudos de Silva (2010) foi utilizado no revestimento asfáltico resíduos industriais de minério de ferro e escória de aciaria, que são resíduos sólidos advindos de mineradoras e das usinas siderúrgicas; e, assim como na pesquisa de Freitas (2010), somente utilizou-se a metodologia Marshall. A brita graduada e a escória de aciaria foram utilizadas nas proporções de agregados graúdos e miúdos e o minério de ferro como material de enchimento (fíler). Todos os resultados foram satisfatórios viabilizando de maneira positiva a utilização desses resíduos em camadas de revestimento asfáltico.

Wesseling (2005) também avaliou o desempenho mecânico de misturas asfálticas com adição do resíduo de escória de aciaria, porém utilizou também na sua pesquisa o resíduo de areia de fundição, ambos em combinações com os agregados minerais de Basalto. O autor concluiu que a adição de ambos os resíduos industriais ao concreto asfáltico elevou o consumo de ligante, já a adição do resíduo de areia de fundição não apresentou bom desempenho nas propriedades mecânicas e também aumentou o consumo de ligante. A

mistura asfáltica apenas com resíduo de escória de aciaria, apresentou resultados satisfatórios de propriedades mecânicas e durabilidade.

Dos vários resíduos industriais incorporados no revestimento asfáltico do pavimento também são analisados a borracha de pneus e a borra oleosa de petróleo, ambos utilizados nesta pesquisa. Há diversos estudos sobre a análise do comportamento mecânico de misturas asfálticas quando adicionados esses resíduos industriais com o objetivo de obter resultados que contribuam para melhoria das propriedades mecânicas e aumento da vida útil desse revestimento asfáltico.

### 2.2.1 Borra oleosa de petróleo

Durante o processo de exploração de petróleo diversos resíduos são gerados e entre eles a borra oleosa de petróleo (Figura 2). Esse resíduo pode ser gerado no processo de tratamento primário do petróleo nas etapas de produção, armazenamento, transporte e durante o processo de destilação do petróleo (no refino).

Figura 2 - Borra oleosa de petróleo



A borra oleosa oriunda do tratamento primário de petróleo é um material semisólido e tem na sua composição argila, óxido de ferro, sílica, óleos, água e, também possui produtos químicos utilizados na produção do petróleo (SANTANA et al. 2018). Segundo Graça,



Cavalcante e Cardoso (2015), a borra oleosa de petróleo tem como característica ser um resíduo de difícil dispersão no ligante asfáltico de petróleo.

As refinarias são responsáveis pela maior produção de produtos acumulados no fundo dos tanques de óleo cru e a borra oleosa é o resíduo gerado em maior quantidade (FERNANDES et al. 2013). Hu, Li e Zeng (2013) estimam que para cada 500 toneladas de petróleo produzido, uma tonelada de borra oleosa é gerada.

Quanto à toxicidade, de acordo com a classificação da NBR 10004 (ABNT, 2004), a borra oleosa de petróleo é classificada como um resíduo perigoso tipo classe I. Entre os componentes mais nocivos presentes é possível destacar: hidrocarbonetos policíclicos aromáticos, cancerígenos e mutagênicos (FERNANDES et al. 2013).

Em relação ao impacto ambiental causado pela borra oleosa, este pode ser reduzido com o uso das tecnologias, como também por meio do seu reaproveitamento (FARIAS, et al. 2011). De acordo com Abreu, Magalhães e Gurgel (2012) entre as tecnologias existentes para o tratamento da borra, o biológico é o que apresenta menor custo. As outras técnicas são: solidificação e reutilização em pavimentos asfálticos, além de incineração, coprocessamento e encapsulamento de contaminantes.

Para Butt et al. (2008) há algumas vantagens em aproveitar a borra oleosa de petróleo, sendo elas: o reaproveitamento diminui o acúmulo de resíduos e consequentemente seu armazenamento, diminui o custo da indústria petrolífera para disposição desse resíduo e reduz os impactos ambientais.

Farias et al. (2011) afirmaram que apesar de serem pesquisas recentes já existem alguns benefícios de utilizar a borra oleosa na modificação do asfalto, como a diminuição nos custos de manutenção dos pavimentos rodoviários, aumento da resistência à oxidação e ao envelhecimento.

### 2.2.2 Borracha de recauchutagem de pneus

A grande quantidade de pneus inservíveis produzida gera preocupações quanto ao seu descarte na natureza. Esse material, quando dispostos em áreas inapropriadas, geram danos ao meio ambiente e a área de aterros sanitários se torna inviável pelo tamanho volumoso dos pneus. A resolução 416/2009 do Conama (Conselho Nacional do Meio Ambiente) estabelece

que as empresas que fabricam pneus fiquem obrigatoriamente responsáveis pelo recolhimento e destino desses materiais.

Chung e Hong (2009), afirmaram que no final do século XX somados o consumo de borracha natural e borracha sintética totalizavam a marca de doze milhões de toneladas por ano. Conforme Taha et al. (2008), a incorporação de borracha de pneus na modificação do asfalto, além de ser uma questão ambiental, também é a oportunidade de reaproveitamento de resíduos de borracha de pneus inservíveis disponíveis em elevada quantidade.

Dentro do ramo da engenharia a utilização desses pneus inservíveis nas misturas asfálticas é uma solução tanto ambiental quanto tecnológica. A borracha de pneus inservíveis é classificada como um polímero sintético utilizado como modificador das propriedades do asfalto (BERNUCCI et al. 2006). A adição de polímeros no ligante asfáltico melhora suas características reológicas e propriedades físicas. O tamanho da partícula tem um papel fundamental para obter uma mistura homogênea e estabilizada, porém a eficiência dessa incorporação depende do tipo de polímero e também do tipo de ligante. Diversos polímeros estão sendo utilizados com êxito na indústria da pavimentação entre os quais se destaca o elastômero termoplástico (BEHNOOD E GHAREHVERAN, 2018).

Segundo Polacco et al. (2006), os teores de polímeros adicionados no ligante asfáltico variam entre 3% e 7%. Os autores também deixam claro que um fator relevante é a compatibilidade do polímero com o ligante. Sendo assim, a incorporação do polímero eleva a durabilidade do pavimento, reduz os custos com manutenção, aumenta a resistência ao envelhecimento e também à oxidação.

O polímero pode melhorar de forma significativa o desempenho do pavimento em baixas, médias e altas temperaturas, elevar a resistência quanto à deformação permanente e a fadiga. Pequenos teores de polímeros já são suficientes para elevar a vida útil do pavimento rodoviário (KALANTAR, KARIM, MAHREZ, 2012). O uso da adição de borracha de pneus é bastante utilizado por resolver problemas ambientais, mas também pelos benefícios atribuídos às propriedades mecânicas como melhor flexibilidade e diminuição do ruído de tráfego (PRESTI, 2013).

### 2.3 Ligante asfáltico modificado

Ligante asfáltico é uma mistura de hidrocarbonetos derivados do petróleo de maneira natural ou por destilação. Como propriedade é termoviscoplastico, além de ser impermeável e pouco reativo a água (BERNUCCI et al. 2006). Ao longo da vida útil acontece o envelhecimento do asfalto e entre as diversas causas podem ser citadas as cargas do tráfego, influência de fatores climáticos e, principalmente, a oxidação. Decorrente disso, o comportamento mecânico e químico são alterados, modificando as propriedades do ligante asfáltico.

O aumento do volume de tráfego de veículos no Brasil influencia diretamente nas mudanças das propriedades do revestimento asfáltico, o que prejudica seu desempenho de serviço antes do tempo previsto. Como alternativa para estender o tempo de vida útil do pavimento são utilizar os ligantes modificados.

Há agentes modificadores não convencionais como nanomateriais e minerais de argila, por exemplo, sendo que estes materiais podem melhorar ou piorar as propriedades do ligante (BEHNOOD E GHAREHVERAN, 2018). Nos estudos de Santos et al. (2015), ao adicionarem argila montmorilonita e a montmorilonita modificada, obtiveram bons resultados, elevando os valores do módulo de resiliência e resistência à tração.

Dos materiais adicionados ao ligante que elevam o comportamento mecânico das misturas asfálticas também estão os grupos dos polímeros e das borrachas. A borracha melhora a durabilidade do pavimento que durante o processo absorve o ligante asfáltico tornando-o um resíduo mais elástico (SHEN, LI E XIE, 2017).

Modificar o ligante através da adição de polímero vem sendo utilizado há algum tempo na indústria devido ao melhoramento das propriedades físicas e reológicas do ligante. Porém, essa modificação pode acarretar algumas desvantagens quanto à característica de baixa solubilidade, ou seja, ainda são necessários outros estudos quanto à melhor análise da estrutura interna do cimento asfáltico de petróleo (CAP) modificado com polímero. O tipo de polímero adicionado deve ter compatibilidade com o ligante para evitar o problema de separação de fases durante as etapas de armazenamento, transporte, aplicação e serviço (BEHNOOD E GHAREHVERAN, 2018).

Os principais defeitos do revestimento asfáltico são a deformação permanente e trincas por fadiga. As pesquisas mostram que a adição de borracha de pneus na mistura asfáltica resulta em bom desempenho, elevando sua flexibilidade. As principais vantagens do ligante modificado com borracha são: vida útil prolongada, maior resistência ao envelhecimento,

melhor aderência pneu pavimento, diminuição do ruído gerado pelo tráfego, menos aquaplanagem em dias chuvosos (ODA, 2000).

A incorporação de agentes modificadores ao ligante puro pode ser através de dois métodos: método por processo seco e úmido. Segundo Bertollo (2002), a borracha de pneus triturada adicionada a mistura asfáltica pelo processo seco seria quando a partícula de borracha é incorporada parcialmente como agregado mineral. Já pelo processo úmido as partículas de borracha de pneus são misturadas ao ligante asfáltico aquecido.

### 2.3.1 Ligante asfáltico modificado por via seca

Na mistura asfáltica com ligante modificado por via seca inicialmente todos os materiais são incorporados como agregados minerais ou substitui-se parte deles de maneira direta na mistura asfáltica. Apesar de ainda ser um método pouco utilizado, Wang, Cheng e Xiao (2017) afirmaram que o processo por via seca tem se tornado mais popular na indústria.

No processo seco não há modificação química do ligante asfáltico e é pouco utilizado nas pesquisas científicas comparado ao processo úmido (CAO, 2007). As misturas asfálticas pelo processo via seca são menos complexas e de menor custo do que as produzidas por via úmida. Nesse método as partículas de modificadores são incorporadas de maneira direta à mistura como agregados (SILVA, BENTA e SANTOS, 2017). A Figura 3 representa a modificação do ligante asfáltico pelo processo seco, sendo que as esferas vermelhas representam a borracha de pneus e as esferas cinza os agregados.

Figura 3 - Representação esquemática de obtenção de CAUQ por via seca



Fonte: Hassan, et al. (2014)

Dentro do processo de misturas asfálticas por via seca, os primeiros relatos surgiram na Suécia com a adição de partícula de borracha com o objetivo de aumentar a durabilidade e resistência do pavimento. Logo em seguida a tecnologia foi patenteada para uso nos Estados Unidos (HASSAN et al. 2014).

Shen, Li e Xie (2017) analisaram em seu estudo a interação entre a borracha de pneus e o ligante asfáltico pelo processo seco e observaram que as reações químicas ocorridas por esse método são insignificantes, devido à possibilidade do uso de maior tamanho e teor da partícula de borracha nesse processo. Para Cao (2007), o teor de borracha de pneus tem uma influência significativa no desempenho quanto à resistência à deformação permanente.

Silva, Benta e Santos (2017) apontam que os últimos estudos têm sido realizados para agregar mais conhecimento sobre a incorporação de partículas ultrafinas de borracha de pneus à mistura asfáltica. As vantagens da utilização de borracha ultrafinas por processo por via seca é que apresentam melhor desempenho à deformação permanente, à fadiga e ao desenvolvimento de fissuras.

De acordo com Cao (2007), o processo por via seca apresenta vantagens em comparação ao processo úmido, principalmente em relação à quantidade de material modificador a ser incorporados e menores custos de produção. Porém, o material adicionado por esse método participa das misturas asfáltica como carga e diferentemente do processo úmido, não transfere suas propriedades para o ligante asfáltico.

O método seco é uma escolha para evitar a separação de fases durante o tempo de estocagem. Através desse método não há aumento do tamanho da partícula de borracha, o que pode fortalecer a interação ligante e o agente modificador durante esse processo (WANG, CHENG E XIAO, 2017).

Nas pesquisas de Cao (2007) o comportamento mecânico das misturas asfálticas produzidas pelo processo de via seca apresentaram bons resultados com relação à resistência à tração indireta e deformação permanente. O teor de borracha teve efeito significativo nas propriedades mecânicas: para estabilidade dinâmica apresentou melhores resultados com o teor de borracha de 3%, teor máximo utilizado pelo pesquisador, essa mesma porcentagem diminui o valor do módulo de rigidez dessa mistura.

Hassan et al. (2017) também analisaram em sua pesquisa o desempenho mecânico das misturas produzidas pelo processo de via seca e dosados pelo método Marshall. Foi observado

que quanto maior o teor de borracha, maior a elasticidade das misturas e obtiveram bons resultados para resistência a fadiga e deformação permanente.

### 2.3.2 Ligante asfáltico modificado por via úmida

No processo de modificação de ligante asfáltico por via úmida, o procedimento é realizado por sistema de tanques especiais na própria central de armazenamento de ligante asfáltico. O processo por via úmida consiste em adicionar algum material a um ligante asfáltico, como mostra o exemplo da Figura 4, na figura as esferas vermelhas representa a borracha de pneus.

Figura 4 - Representação esquemática de obtenção de ligante asfáltico modificado por via úmida



Fonte: Hassan, et al. (2014)

Na modificação do ligante asfáltico, o processo de via úmida é o mais antigo e bastante utilizado quando comparado ao processo por via seca. É considerada uma das soluções mais empregadas para os defeitos que surgem no revestimento asfáltico ao longo do tempo. Esse processo é bastante utilizado nos Estados Unidos e Novo México; na África do Sul é utilizado largamente e com êxito os dois processos, tanto seco quanto úmido, na Austrália, os ligantes modificados com borracha, é adotado apenas o processo úmido (PRESTI, 2013).

Ding et al. (2017) afirmaram que no processo de modificação do ligante asfáltico pelo processo de via úmida, o modificante é pré misturado ao ligante asfáltico e em seguida, o ligante já modificado é aglutinado aos agregados. Para os autores esse método é considerado o processo mais eficiente para melhorar o comportamento mecânico do ligante ao utilizar

borracha como modificador, por exemplo, em torno de 15% a 25%. Porém, os pesquisadores afirmaram que durante a mistura do ligante asfáltico e o agente modificador, podem ocorrer complicações nas reações químicas, e diante disso, apresentar dificuldades em temperaturas elevadas, como a separação de fases e instabilidade durante a estocagem. Uma alternativa diante dessas dificuldades seria equipamentos específicos que produzam o ligante modificado imediatamente antes de empregar a mistura asfáltica em campo.

Contudo, a maior dificuldade do processo por via úmida é a separação de fases que ocorre durante o período de estocagem do ligante modificado. Para Ding et al. (2017), a separação de fases é o grande obstáculo no processo de via úmida.

Além da instabilidade quanto à estocagem do ligante modificado por via úmida, outra ocorrência preocupante é o aumento significativo da viscosidade quando incorporados polímeros ao ligante. A separação de fases dificulta a estocagem em altas temperaturas e a viscosidade elevada exige a necessidade de desprender uma maior energia no processamento de mistura e na compactação (SANTANA et al. 2015). No processamento de mistura asfáltica as partículas de borracha absorvem as frações mais leves do ligante e entumecem, elevando assim viscosidade do ligante modificado (SANTAGATA, CANESTRARI E PASQUINI, 2007).

Kandhal (1992) afirma que a viscosidade aumenta devido ao entumecimento da borracha que ocorre a partir de uma interação química e física entre ambos. Quando a mistura asfalto-borracha é muito viscosa, normalmente é adicionado um óleo extensor, contudo quando é incorporado menos de 10% de borracha ao ligante asfáltico, o óleo extensor não se faz necessário. Washington (1992) cita também como uma limitação no processo de modificação de ligante asfáltico por via úmida, a manutenção de temperatura constante no tanque de processamento e armazenamento de ligante.

Um estudo interessante foi feita por Shen, Li e Xie (2017) no qual tinham como principal objetivo observar as interações entre a borracha e o ligante asfáltico modificado por via úmida e seca. Observaram que no processo por via úmida ocorre um maior envelhecimento do ligante devido ao processo de pré-mistura do ligante com a borracha antes do processamento da mistura asfáltica.

A distância entre a usina e o local de aplicação da mistura tem influência relevante na consistência às altas temperaturas, pois a interação agente modificador e ligante acontece também durante o transporte (NGUYEN E TRAN, 2018). No método por via úmida o ligante

é reaquecido e esse processo envelhece ainda mais o ligante (SANTAGATA, CANESTRARI E PASQUINI, 2007).

Santagata, Canestrati e Pasquini (2007) realizaram análise mecânica em um CAP 70/100 modificado com borracha de pneus por via úmida. O CAP 70/100 modificado com borracha de pneus foi submetido ao ensaio de módulo de resiliência e o resultado obtido foi satisfatório com um valor de 3907 MPa acima do recomendado na norma DNIT 136/2010. Além disso, como a borracha eleva a viscosidade da mistura, isso permite um teor maior de ligante apresentando bons resultados de módulo de resiliência.

## 2.4 Comportamento mecânico de misturas asfálticas

O pavimento rodoviário é submetido constantemente a frequentes cargas de tráfego e mudanças climáticas, consequência disso, o pavimento sofre um processo de degradação funcional e estrutural. Bernucci et al. (2006) afirmaram que o desempenho funcional está relacionado como a superfície do pavimento influencia no conforto do rolamento, já o desempenho estrutural está associada aos defeitos ligados a capacidade de carga desse pavimento. Nas misturas asfálticas ocorre ainda o envelhecimento gradativo devido à presença do ligante asfáltico que sofre oxidação.

Para Lima (2003), a oxidação do ligante é a razão principal do envelhecimento da mistura que ocorre ainda na etapa de usinagem quando a mesma tem contato com o oxigênio e não somente nessa etapa, como também na fase de estocagem e compactação da mistura. Diante disso, existe a necessidade de prever o comportamento das misturas asfálticas para obter um pavimento rodoviário com melhor desempenho estrutural e consequentemente funcional.

Diversos defeitos podem surgir no pavimento asfáltico. Para o DNIT (2003) as falhas que comprometem o desempenho funcional do pavimento são: as fendas, afundamentos, ondulações, exsudação, desgaste e o remendo. Já os principais defeitos mecânicos que comprometem a estrutura do pavimento são trincamento por fadiga e deformação permanente. (BERNUCCI et al. 2006). Portanto, é importante prever e analisar o comportamento mecânico das misturas asfálticas, seja em campo e também em laboratório, neste é submetido aos ensaios laboratoriais de caracterização mecânica.



Os principais ensaios mecânicos para caracterização de misturas asfálticas são: estabilidade Marshall, resistência à tração indireta, módulo de resiliência, vida de fadiga, deformação permanente, cântabro e dano por umidade induzida (BERNUCCI et al. 2006). A relevância de analisar essas propriedades permite caracterizar o comportamento estrutural dessa mistura a fim de prever o surgimento de defeitos e garantir a qualidade do pavimento durante a sua vida de serviço.

## 2.5 Caracterização de ligante asfáltico modificado

Os mesmos ensaios de caracterização que são utilizados para o CAP puro são também aplicados para o CAP modificado. A etapa experimental dos estudos visa caracterizar todos os materiais da mistura, para o CAP, os resultados alcançados nos ensaios dos materiais precisam atender às exigências das especificações brasileiras regulamentadas e dos órgãos do setor de pavimentação rodoviária. No ano de 2005, através da Resolução de 019/2005 da Agência Nacional de Petróleo (ANP), adotou-se uma nova especificação para o CAP. O DNIT também normatiza as especificações do ligante asfáltico por meio da norma 095/2006, esta norma classifica os CAP-30/45, CAP-50/70, CAP-85/100 e CAP-150/200.

Todas as propriedades físicas do asfalto estão relacionadas à sua temperatura. Em temperaturas baixas a viscosidade do CAP é elevada e em temperaturas mais altas o CAP se comporta praticamente como um líquido. Dessa maneira, todos os ensaios realizados para medir as propriedades físicas do CAP, seja ele puro ou modificado, têm temperatura identificada (BERNUCCI et al. 2006).

Para o DNIT 095/2006, os ensaios de caracterização física do CAP são: penetração, viscosidade, ductilidade, solubilidade, durabilidade, ponto de amolecimento, ponto de fulgor e massa específica. Bernucci et al. (2006) afirmaram que as duas principais caracterizações físicas mais utilizadas são: resistência de fluxo, através do ensaio de viscosidade, e “dureza” através do ensaio de penetração. Os ensaios físicos de caracterização do cimento asfáltico podem ser classificados entre os ensaios de consistência, durabilidade, dureza e de segurança.

## 2.6 Mistura asfáltica com ligante modificado

Com a finalidade de melhorar as propriedades mecânicas do revestimento cada vez mais se produz mistura asfáltica com ligante modificado. As misturas asfálticas são produzidas com diversos tipos de agentes modificantes podendo ser polímeros e, até mesmo, vários tipos de resíduos. Segundo Santana (2015), esses modificadores propicia uma melhora nas características do ligante e também das misturas asfálticas. O objetivo principal das pesquisas experimentais com teores adequados de ligante e modificantes são melhorar o comportamento mecânico sem interferir em outras propriedades.

Antona e Frota (2011) afirmaram que, como as misturas asfálticas estão sujeitas à ação repetida dos tráfegos, surgem diversas deformações sejam plásticas ou até mesmo permanentes. Ainda, há uma busca constante nas alternativas de materiais modificadores que podem ser incorporados ao ligante asfáltico e melhorar as qualidades dessa mistura asfáltica. De acordo com Leite (1999), para elevar a resistência das misturas asfálticas há diversas alternativas de recursos naturais como adição de fíler, fibras, porém, a modificação mais utilizada é a adição de polímeros ou borracha de pneus.

Pesquisadores vêm analisando técnicas com a intenção de melhorar de maneira geral a qualidade da mistura asfáltica, através da adição de modificadores no ligante asfáltico, como fíler, fibras e borrachas (BERNUCCI et al. 2006). As misturas asfálticas com ligantes modificados com polímeros proporcionam a mistura asfáltica propriedades como coesão, durabilidade e também flexibilidade (ODA & FERNANDES JÚNIOR, 2001).

#### 2.6.1 Agregados em mistura asfáltica

De acordo com o Manual de Pavimentação do DNIT (2006), agregados são definidos como materiais pétreos utilizados em pavimentação que podem ser naturais, a exemplo da areia, do seixo rolado, e a argila expandida (artificiais). A norma NBR 9935/2005 define o termo “agregado” como material inerte sem forma e volume definido, utilizado na produção de argamassas e concretos. O termo “agregado” é uma maneira generalizada dada às areias, rochas e pedregulhos.

Bernucci et al. (2006) propõem que os agregados devem suportar tensões advindas de cargas na camada de rolamento. Mendes e Marques (2012) complementam que os agregados são os maiores responsáveis em resistir a grande parte das cargas recebidas pelo pavimento.

Enquanto Chen et al. (2015) afirmaram que em uma mistura asfáltica mais de 90% são agregados minerais.

Dentro da graduação dos agregados o fíler também tem seu papel importante. Segundo Freire, Branco e Vasconcelos (2014), os agregados finos são responsáveis em torno de 80% da resistência à deformação permanente e os 20% restantes é de responsabilidade do ligante asfáltico. Bardini, Klinsky e Junior (2010) dispõe que o fíler preenche os vazios entre os agregados de maior graduação, dessa maneira oferece uma mistura mais fechada, alterando sua trabalhabilidade.

Diversas pesquisas direcionam que a maneira com que os agregados são produzidos, afetam de forma direta suas propriedades responsáveis pelo comportamento mecânico das misturas asfálticas. Forma, distribuição granulométrica e textura, são algumas propriedades que interferem diretamente nas propriedades mecânicas (FREIRE, BRANCO E VASCONCELOS, 2014). Mendes e Marques (2012) afirmaram que os agregados são o esqueleto mineral da mistura, responsável diretamente por propriedades mecânicas importantes como angularidade, textura superficial e dureza. Sendo essas características relevantes ainda na etapa de dosagem para obter uma melhor resistência.

Entre as características citadas, a distribuição granulométrica é uma das mais importantes para a dosagem de misturas. É a etapa primordial para a elaboração da mistura asfáltica para que esta apresente um excelente resultado. Essa característica interfere em quase todas as propriedades mecânicas de uma mistura asfáltica como estabilidade, trabalhabilidade, permeabilidade, resistência à fadiga e a deformação permanente (CUNHA, et al. 2014). O DNIT, através da norma 031/2006, especifica que a distribuição granulométrica dos agregados para a composição do concreto asfáltico deve satisfazer a Tabela 1 (abaixo). Na Tabela são apresentadas três faixas granulométrica sendo a faixa C, a mais utilizada.

Tabela 1 - Faixas Granulométricas recomendadas pelo DNIT para composição de concreto asfáltico

Peneira de malha quadrada		% em massa passante			
Série ASTM	Abertura (mm)	A	B	C	Tolerâncias
2"	50,8	100	-	-	-
1 1/2"	38,1	95 - 100	100	-	±7%
1"	25,4	75 - 100	95 - 100	-	±7%
3/4"	19,1	60 - 90	80 - 100	100	±7%
1/2"	12,7	-	-	80 - 100	±7%
3/8"	9,5	35 - 65	45 - 80	70 - 90	±7%
Nº4	4,8	25 - 50	28 - 60	44 - 72	±5%
Nº10	2,0	20 - 40	20 - 45	22 - 50	±5%
Nº40	0,42	10 - 30	10 - 32	8 - 26	±5%
Nº80	0,18	5 - 20	8 - 20	4 - 16	±3%
Nº200	0,075	1 - 8	3 - 8	2 - 10	±2%
		4,0 - 7,0	4,5 - 7,5	4,5 - 9,0	±0,3%
Asfalto solúvel CS2(+)		Camada de Ligação (Binder)	Camada de Rolamento e Ligação	Camada de Rolamento	

Fonte: Norma DNIT 031 (2006)

Além da norma de granulometria, alguns ensaios de caracterização fazem parte das especificações brasileiras para correta seleção dos agregados. O método de resistência à abrasão, especificado pela norma DNER-ME 035/98, o ensaio de abrasão Los Angeles, que limita a degradação dos agregados entre o valor de 40% e 55% para uso em misturas asfálticas. Além do ensaio de resistência à degradação química com limite no máximo de 12% e índice de forma não inferior a 5% (BERNUCCI et al. 2006).

Para os cálculos de índices volumétricos das misturas asfálticas, é necessário os valores de massa específica dos agregados. A massa específica real é dada pela relação entre a massa seca e o volume do agregado seco, excluindo todo o volume de vazios. A massa específica aparente difere apenas da massa específica real, pois consideram no volume os vazios

permeáveis. Por fim, a massa efetiva que é a relação entre a massa do agregado e o volume do agregado, mais o volume dos vazios que não é preenchido pelo asfalto.

### 2.6.2 Determinação do teor de ligante de projeto

A dosagem de uma mistura asfáltica é um método de escolha do teor de CAP (cimento asfáltico petróleo) e da granulometria de agregados para essa mistura. Para Pinto e Pinto (2018), uma dosagem para mistura asfáltica é uma pesquisa de seleção e dosagem dos materiais que pertencem a essa mistura, tendo como objetivo atender as especificações. Logo após esses materiais são misturados e compactados a uma determinada temperatura.

As misturas asfálticas devem apresentar comportamento mecânico apropriado para resistir e suportar as cargas do tráfego no pavimento. Entre os objetivos de dosagem de uma mistura asfáltica estão: obter uma mistura com teor de CAP adequado para melhor adesividade entre o ligante e o agregado; uma mistura asfáltica com boa trabalhabilidade para melhor produção, lançamento e compactação; apresentar uma baixa deformação permanente, pouca suscetibilidade a fissuração por fadiga e teor de vazios suficientes, sem excessos (BALBO, 2007). Para Takpin, Çevik e Uçar (2010), o teor de ligante é um fator importante para a mistura asfáltica ter boa estabilidade e fluência.

Os métodos de dosagem de ligante asfáltico tipo CAUQ mais empregados são o método Superpave e método Marshall, sendo este último o mais utilizado mundialmente e também no Brasil, enquanto o método Superpave é mais utilizado em estudos acadêmicos mais recentes (BERNUCCI et al. 2006). Wessenling (2005) aponta que os métodos Marshall e Superpave também são os principais métodos de dosagem de misturas asfálticas. E, ainda, Liu et al. (2018) discutem que os dois métodos de dosagens são baseados principalmente na análise do volume de vazios e dos vazios do agregado mineral.

### 2.6.3 Dosagem de ligante em misturas asfálticas

#### A - Dosagem Marshall

O método de dosagem Marshall foi desenvolvido pelo engenheiro Bruce Marshall no início da década de 1940, tendo como norma que o especifica a DNER-ME 43/1995. O método Marshall é o mais empregado no Brasil para misturas asfálticas tipo CAUQ. Pinto e Pinto (2018) complementam que esse tipo de dosagem obedecendo aos requisitos especificados pela norma resulta em uma boa mistura asfáltica. Nesse método de dosagem os golpes são realizados por impactos através de um compactador que pode ser manual ou mecanizado, este último mais eficaz quanto à frequência dos golpes (Figura 5). Para a dosagem Marshall, a norma recomenda o número de 75 golpes em cada face do corpo de prova.

Figura 5 - Compactador Marshall do GEOPAV/DEC/UFS



Os parâmetros volumétricos utilizados para a dosagem Marshall são: volume de vazios, vazios com betume, vazios do agregado mineral e relação betume/vazios (BERNUCCI et al. 2006). A norma do DNIT 031/2006 especifica os valores limites de como a camada asfáltica deverá ser utilizada, Tabela 2.

Tabela 2 – Parâmetros volumétricos e de resistência à tração por compressão diametral (RTCD) para cada tipo de camada de rolamento

Características	Método de ensaios	Camada de rolamento	Camada de ligação
Porcentagem de vazios ( % )	DNER-ME 043	3 -5	4 - 6
Relação Betume/vazios ( % )	DNER-ME 043	75 - 82	65 - 72
Estabilidade mínima (kgf)	DNER-ME 043	500	500
RTCD estática a 25°C, mínima (MPa)	DNER-ME 138	0,65	0,65

Fonte: Norma DNIT 031 (2006)

## B - Dosagem Superpave

Superpave é uma metodologia de dosagem advindo das pesquisas do *Strategic Highway Research Program* (SHRP) e desde 1993 tem como objetivo melhorar o desempenho e durabilidade das rodovias americanas, além de prever o desempenho dos pavimentos. Esse método de dosagem quase não é empregado no Brasil. Bernucci et al. (2006), afirmaram que basicamente o Superpave estima que o teor do ligante é dosado através de um volume fixo de vazios e também da granulometria dos agregados minerais.

Segundo Jitsangian, Chindaprasirt e Nikraz (2013), o principal objetivo do programa SHRP tem sido criar um método de mistura que obtenham melhores resultados através do teor de ligante asfáltico. Para Huang (2004), o método Superpave é fundamentado em conceitos mecanísticos, considerando características dos materiais, tráfego e também interferências climáticas. A principal diferença entre os dois métodos é a forma de compactação: O método Superpave é por amassamento (giros) através de um Compactador Giratório Superpave (CGS), enquanto na dosagem Marshall a compactação é realizada através de impacto (BERNUCCI et al. 2006).

Outra diferença entre os dois métodos é a forma de seleção da granulometria dos agregados, sendo que a dosagem Superpave segue os conceitos de pontos de controle e zona de restrição. Esses critérios de seleção são de graduações mais densas onde apresentam mais estabilidade à mistura, porém é necessária a existência de um volume de vazios para evitar o processo de exsudação. A metodologia da dosagem Superpave é definir uma granulometria e um teor de CAP para alcançar uma mistura com 4% de volume de vazios (BERNUCCI et al. 2006).

#### 2.6.4 Ensaio mecânico de misturas asfálticas - Métodos de Ensaio

Quando as cargas do tráfego e ações climáticas influenciam sobre o pavimento asfáltico ocorre um processo de perda de capacidade funcional e estrutural. Isso indica alterações no comportamento mecânico desse pavimento, consequentemente interferindo no conforto da camada de rolamento e segurança do usuário. No entanto, a capacidade de resistir a esforços, irregularidades longitudinais e transversais é resultante naturalmente de alterações estruturais (BALBO, 2007).

Segundo Sales (2015), é cada vez mais concreto que para o pavimento alcançar com êxito sua função estrutural e, consequentemente funcional, é necessário um constante controle tecnológico dos materiais durante o processo de mistura como também analisar as propriedades mecânicas das misturas depois de produzidas. O DNIT (2003) classifica alguns defeitos que surgem no pavimento flexível e semi-flexível como afundamento, desgaste, buraco, remendo, ondulação, entre outros. Diante disso, são necessários métodos comparativos com as ações oriundas do tráfego para auxiliar no dimensionamento da camada de pavimento, como manter a qualidade durante sua vida útil.

##### A - Ensaio de resistência à tração por compressão diametral (RTCD)

Resistência à tração por compressão diametral (RTCD) ou resistência à tração (RT) é conhecido fora do Brasil como “ensaio brasileiro”. Esse método foi criado por Lobo Carneiro em 1934 para estabelecer a resistência à tração de corpos de prova cilíndricos de concreto de cimento Portland. Esse mesmo método determina a resistência de misturas asfálticas usinadas à quente (DNIT, 2006). No Brasil é popularmente conhecido pela agilidade na execução, mas principalmente por utilizar o mesmo corpo de prova cilíndrico e o mesmo equipamento para obtenção da resistência de corpos-de-prova cilíndricos de cimento Portland (BERNUCCI et al. 2006). Os autores ainda afirmaram que esse método foi adotado a partir de 1972 para caracterização de misturas asfálticas.

O método que especifica o ensaio de resistência à tração por compressão diametral é DNIT 136/2010 e os corpos de prova cilíndricos podem ser moldados em laboratórios e também extraídos do campo. Os mesmos são colocados na horizontal na qual são aplicadas



cargas progressivas e distribuídos através de dois frisos, com 1,27 cm de largura cada um e curvatura apropriada ao corpo-de-prova cilíndrico. A tensão de tração é gerada quando o corpo-de-prova cilíndrico é submetido diametralmente por cargas concentradas de compressão. A tensão de tração é obtida, perpendicularmente, à direção do esforço aplicado. A Figura 6 mostra o esquema de ruptura do ensaio de tração à compressão diametral e a equação (1) expressa a resistência à tração.

$$RT = \frac{2P}{100\pi Dr} \quad \text{eq. 1}$$

Em que:

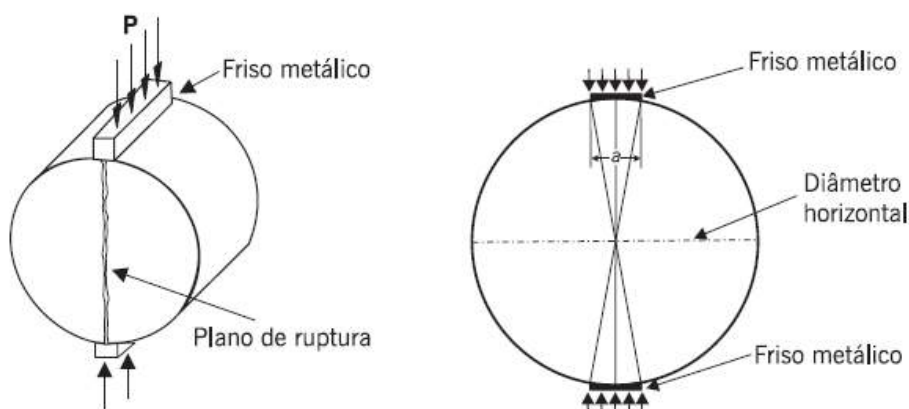
RT – Resistência à tração (MPa);

P – Carga de ruptura (N);

D – Diâmetro do corpo de prova (mm);

r – Raio do corpo de prova (mm).

Figura 6 - Esquema de ensaio de compressão diametral

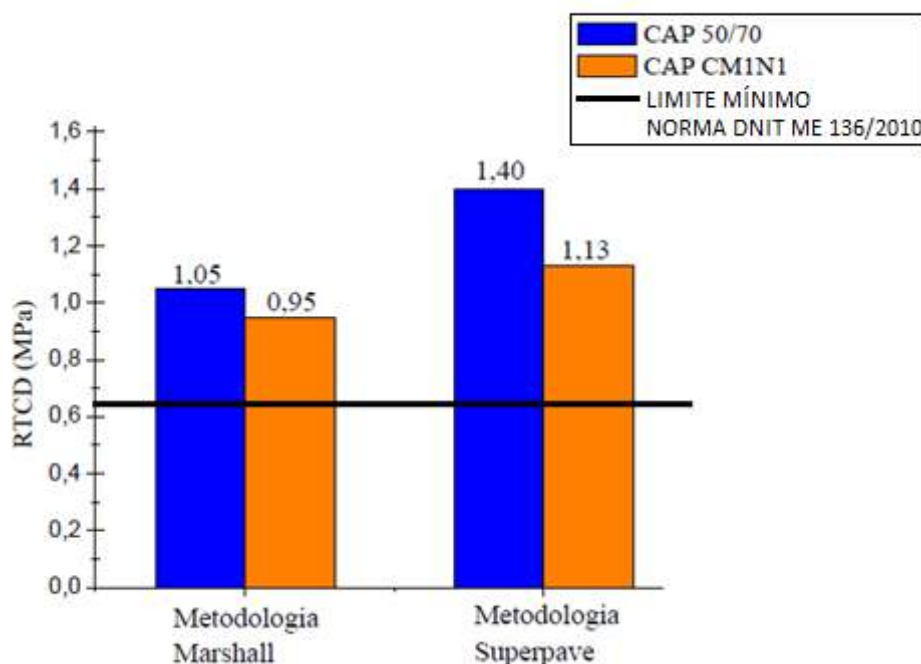


Fonte: Bernucci et al. (2006)

Santana (2015), em sua pesquisa, realizou o ensaio de resistência à tração por compressão diametral (RTCD) em mistura asfáltica (processadas pela metodologia Marshall e Superpave) de CAP 50/70 modificado, por via úmida, com 10% de M1 (pré-mistura de 85%

de borra oleosa e 15% de borracha reciclada de pneus). Observou que o RTCD apresentaram valores acima do limite mínimo recomendado pela norma 136/2010 de DNIT, porem ligeiramente inferior ao RTCD da mistura do CAP 50/70 sem modificação (Figura 7).

Figura 7 - Resultados da resistência à tração por compressão diametral (RTCD) de mistura asfáltica com CAP 50/70 sem e com modificação, por via úmida, com 10% de M1



Fonte: Santana (2015)

## B - Módulo de resiliência (MR)

Resiliência é definida como energia armazenada em um material que quando submetido a uma força, sofre deformação elástica. As pesquisas sobre resiliência dos materiais empregados em pavimentação asfáltica começaram na década de 1930 comparando as deformações recuperáveis com as fissuras que surgiam no pavimento asfáltico (BERNUCCI et al. 2006). A norma atual DNIT 135/2017 é que especifica o ensaio do módulo de resiliência (MR) em misturas asfálticas. A norma define o módulo de resiliência de misturas asfálticas como a relação entre a tensão de tração ( $\sigma_t$ ) aplicada de forma repetida no plano diametral vertical e a deformação própria recuperável ( $\varepsilon_t$ ) correspondente à tensão aplicada em uma determinada temperatura.

O Módulo de Resiliência (MR) é um parâmetro primordial para o dimensionamento empírico-mecanístico de pavimentos flexíveis, rígidos e semirrígidos. O MR é considerado constante para os revestimentos com camadas rígidas e semirrígidas (FREITAS, 2010). Para Bernucci et al. (2006), o valor do módulo de resiliência é determinado pela relação entre a tensão aplicada ( $\sigma$ ) e as respectivas deformações ( $\epsilon$ ) sofridas, de acordo com equação 2 abaixo.

$$M = \frac{\sigma}{\epsilon} \quad \text{eq. 2}$$

Em que:

MT – Módulo de resiliência;

$\sigma$  – Tensão de tração aplicada diametral;

$\epsilon$  – Deformação resiliente.

Já no plano diametral, para Bernucci et al. (2006) a tensão de tração é representada pela equação 3.

$$\sigma_t = \frac{2P}{\pi h d} \left[ \frac{d^2 - 4x^2}{d^2 + 4x^2} \right]^2 \quad \text{eq. 3}$$

Em que:

$P$  – Carga aplicada;

$h$  – Altura do corpo de prova;

$d$  – Diâmetro da amostra;

$x$  – Abcissa do ponto considerado.

Sobre o coeficiente de Poisson, quando se refere a misturas asfálticas, pode ser considerado independente do tipo de carga. Está especificado na norma brasileira assumir de maneira geral o valor de 0,30 (BERNUCCI et al. 2006). Com os conhecidos valores de carga aplicada e com deslocamentos na direção horizontal que se recuperam, o módulo de resiliência é calculado através da equação 4.

$$M = \frac{P}{\Delta \times H} (0,9976\mu + 0,2692\mu) \quad \text{eq. 4}$$

Em que:

MR – Módulo de resiliência (MPa);

P – Carga aplicada;

$\Delta$  – Deslocamento elástico ou resiliente;

H – Altura do corpo de prova;

$\mu$  – Coeficiente de Poisson;

C - Ensaio de carga repetida em misturas asfálticas.

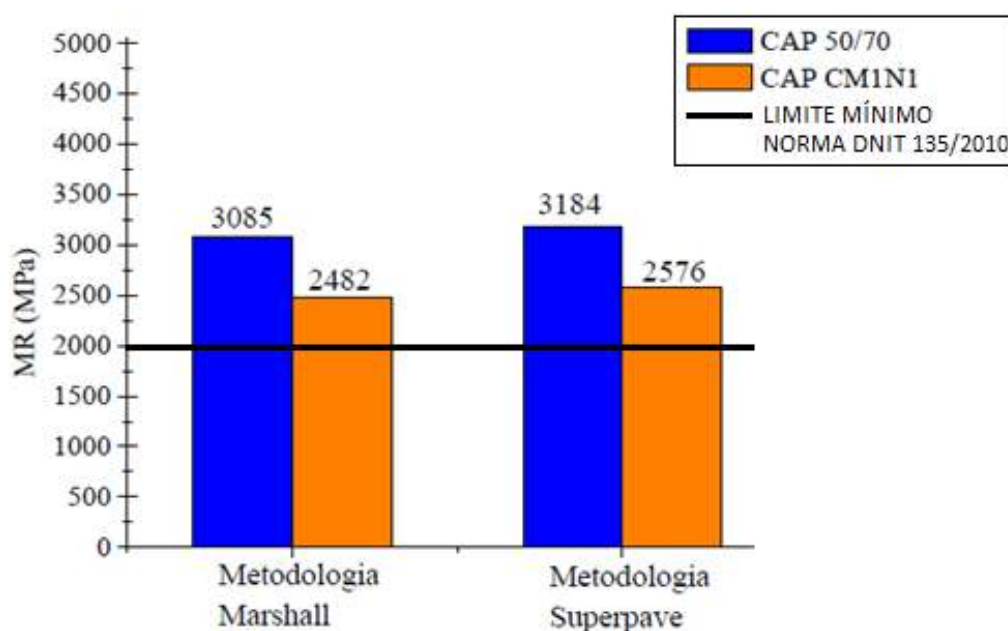
Momm e Salini (2000) modificaram o CAP-20 adicionando 0,7% de borracha reciclada de pneus pelo processo via seca. O autor analisou seu módulo de resiliência (Tabela 3) dosados pelo método Marshall e os resultados mostraram valores de módulo de resiliência do ligante asfáltico modificado com borracha reciclada de pneus menores quando comparados aos valores de módulo de resiliência da mistura asfáltica com CAP-20 não modificado, ou seja, sem adição da borracha de pneus.

Tabela 3 – Resultado do módulo de resiliência (MR) de misturas asfálticas com CAP-20	
Mistura asfáltica com CAP-20 não modificado (MPa)	Mistura asfáltica com CAP-20 modificado com borracha de pneus (MPa)
4314	3345
3630	3100
5563	2630

Fonte: Momm e Salini (2000)

Santana (2015) modificou o CAP 50/70 com 10% de M1 (pré-mistura de 85% de borra oleosa e 15% de borracha de pneus) por via úmida, utilizando o método Marshall e o método Superpave. Para as misturas asfálticas modificadas com M1, os resultados mostraram valores de módulo de resiliência inferiores, quando comparados ao módulo de resiliência da mistura asfáltica sem adição de M1 (Figura 8), contudo, acima do limite mínimo estabelecido pela Norma DNIT 135/2010 e dentro da faixa recomendada por Bernucci et al. (2006) para misturas asfálticas (2000 a 8000 MPa) para ligante asfáltico modificado.

Figura 8 – Resultados do ensaio de módulo de resiliência de mistura asfáltica com ligante modificado com resíduo industrial M1



Fonte: Santana (2015)

#### C – Dano por umidade induzida – Lottman

Esse ensaio é baseado no trabalho de Lottman que segue o procedimento descrito na especificação ASTM D 4768. O ensaio de Lottman é a razão da resistência à tração dos corpos de prova de misturas asfálticas condicionadas e não condicionadas, também denominado como RRT. Bernucci et al. (2006) afirmaram que a análise do dano nas misturas asfálticas ocasionada pela umidade é bastante relevante, já que essa propriedade prejudica o desempenho e a vida útil dos pavimentos. A adesividade entre ligante e agregado é

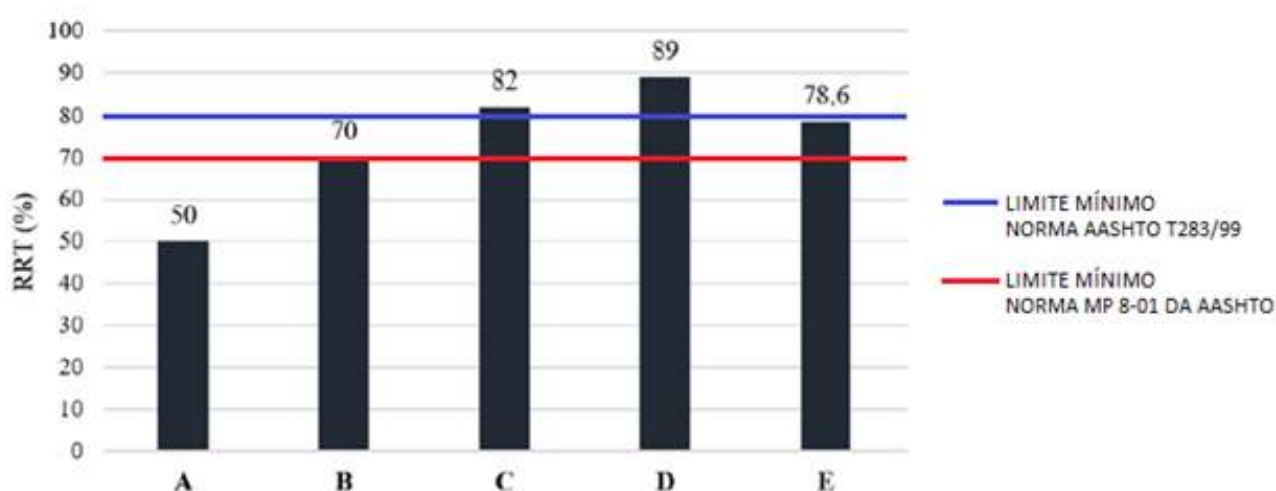
evidenciado através do ensaio de dano por umidade induzida e a norma recomenda resultados mínimos de 70%.

Nos estudos de Furlan (2006) foi analisado a adesividade de misturas asfálticas densas através da ação da água, este método tem como objetivo prever o desempenho de misturas asfálticas em relação à adesividade entre o CAP 50/70 e os agregados em campo. Os danos por umidade ocasionam outros defeitos como trincas por fadiga e afundamento de trilha de roda, que são acelerados pela presença da água.

Carvalho (2018) realizou ensaios de Lottman em misturas asfálticas com ligantes modificados por polímero reativo/ não reativo associadas ao ácido polifosfórico e comparou com misturas asfálticas não modificadas de CAP 50/70 e CAP 55/75; as misturas asfálticas foram dosadas pelo método Superpave utilizando o processo via úmida. Os polímeros modificadores utilizados nesta pesquisa foram: Etileno Acrilato de Metila e Metacrilato de Glicidila (EMA-GMA) comercialmente conhecido por S74, terpolímero de Alta densidade (SX500) e Ácido Polifosfórico (PPA 116). Foram dosadas misturas asfálticas modificadas com 1,8% de S74, 0,3% de SX500 associadas a teores variados de 0,15%; 0,3% e 0,5% de PPA116%.

Carvalho (2018) analisou os resultados de Lottman pela norma AASHTO T283/99 com critério RRT de 80%, enquanto que a MP 8-01 da AASHTO estabelece o limite mínimo para RRT de 70%. Os resultados mostraram que apenas a mistura asfáltica com CAP 50/70 não atendeu ao valor mínimo recomendado, o autor afirma que misturas asfálticas com CAP não modificado são mais suscetíveis ao dano por umidade induzida, sendo assim são misturas asfálticas que apresentam maior possibilidade de surgir degradação no pavimento. Já todas as outras misturas asfálticas estudadas apresentaram resultados dentro do limite mínimo recomendado em norma (Figura 9). O pesquisador concluiu que a modificação do ligante com os polímeros reativos, não reativos e o ácido polifosfórico contribuíram para melhorar a resistência à tração de todas as misturas asfálticas após o condicionamento. A mistura asfáltica denominada como D foi a que obteve melhor desempenho de Lottman, pois foi a mistura asfáltica que menos apresentou perda significativa após o condicionamento.

Figura 9 - Resultados do ensaio de RRT de misturas asfálticas com ligante modificado com polímeros S74, SX500 e PPA116

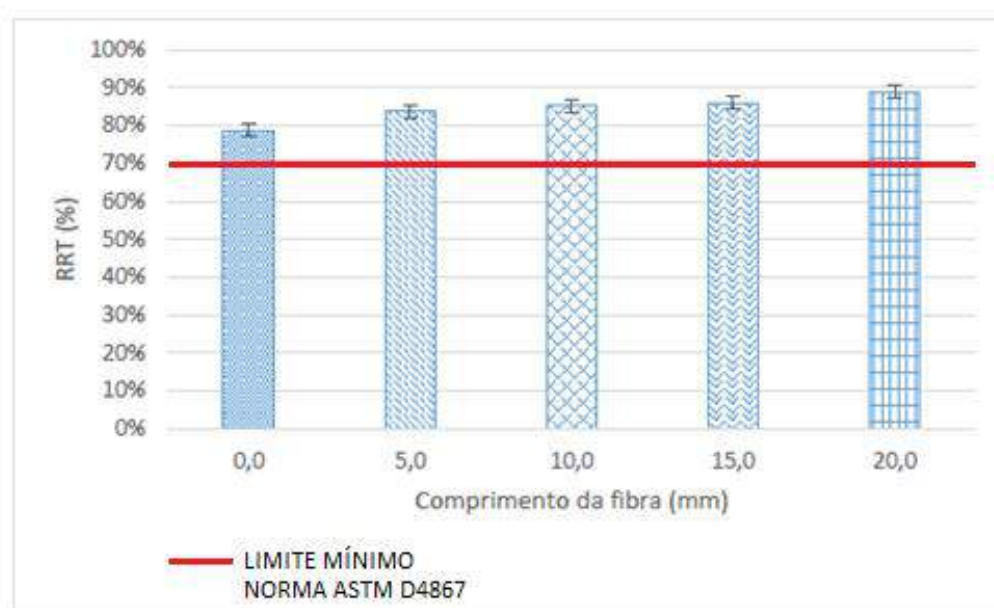


Fonte: Carvalho (2018)

A identificação das misturas asfálticas estudadas por Carvalho (2018) foram: A – mistura asfáltica não modificada com 100% de CAP 50/70, B – mistura asfáltica não modificada com 100% de CAP 55/75, C – mistura asfáltica modificada com 1,8% de S74 + 0,3% de SX500 + 0,15% de PPA116, D – mistura asfáltica modificada com 1,8% de S74 + 0,3% de SX500 + 0,30% de PPA116, E – mistura asfáltica modificada com 1,8% de S74 + 0,3% de SX500 + 0,50% de PPA116.

Costa (2017) também analisou em seus estudos os danos da água em misturas asfálticas, porém utilizou misturas asfáltica SMA. Utilizando o CAP 50/70, este foi modificado pelo processo via úmida com 0,3 % de fibras de pseudocaule da bananeira avaliando a influência do seu comprimento no desempenho mecânico da mistura asfáltica. A Figura 10 mostra que todas as misturas asfálticas com ligante modificado apresentaram resultados de danos por umidade acima do limite recomendado na norma ASTM D4867, o que já era possivelmente esperado pelo pesquisador já que a mistura SMA possui elevado teor de cal hidratada que influencia de forma positiva no processo de adesividade. E quando comparada as misturas asfálticas com fibras e misturas asfálticas sem fibras, ou seja, de 0%, as misturas asfálticas modificadas com adição da fibra de bananeira apresentaram resultados de RRT superiores. Com o aumento do comprimento da fibra de bananeira adicionada à mistura asfáltica, houve um pequeno incremento nos valores de RRT.

Figura 10 - Resultados do ensaio de RRT de misturas asfálticas com CAP 50/70 modificado com fibras de bananeira



Fonte: Costa (2017)

Nos estudos de Santana (2015) foi realizado o ensaio de dano por umidade induzida em misturas asfálticas com ligante modificado com M1 (85% de borra oleosa e 15% de borracha de pneus) pelo processo de via úmida pelo método Marshall. O resultado do ensaio de Lottman para a mistura asfáltica com CAP 50/70 modificado com o resíduo industrial M1, foi de 63,4 %, um valor próximo ao limite mínimo exigido na norma ASTM D4867, que é de 70%.



### **3 MATERIAIS E MÉTODOS**

#### **3.1 MATERIAIS**

- CAP 50/70 – Fornecido pela Emurb – Empresa Municipal de Urbanismo do Município de Aracaju/Se.
- Raspa de borracha de pneus inservíveis advindas de recauchutagem de pneus com granulometria inferior a 0,500 mm adquirida em empresa de recauchutagem da cidade de Aracaju/SE.
- Borra oleosa de petróleo – Advindas da Petrobrás/UO-SEAL (Unidade operacional Sergipe – Alagoas).
- Agregados minerais graúdo, intermediário e pó de pedra (fíler) – Doados pela usina de concreto asfáltico da Empresa Empresa Municipal de Urbanismo do Município de Aracaju/Se.

#### **3.2 MÉTODOS**

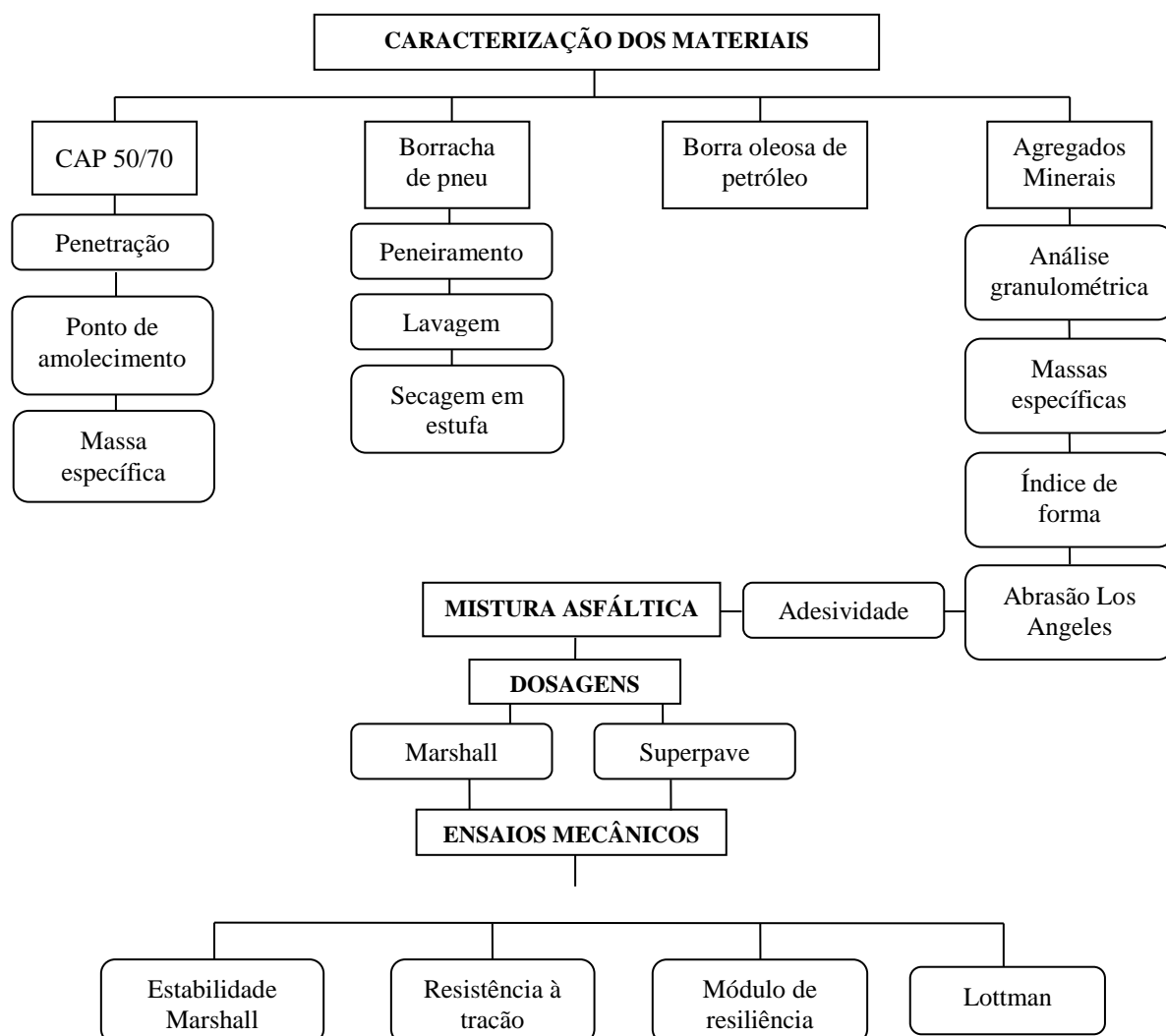
Nesse item é apresentada a metodologia de caracterização dos materiais, de dosagem e avaliação das misturas dosadas na fase experimental da pesquisa. As misturas asfálticas foram dosadas pelos métodos Marshall e Superpave onde todos os componentes da mistura, inclusive os resíduos de borracha de recauchutagem de pneus e borra oleosa de petróleo, foram incorporados como agregados minerais por adição na etapa de mistura, ou seja, pelo processo de via seca. A mistura dos dois resíduos industriais borra oleosa de petróleo e borracha de pneus foi denominada de M1, nas concentrações de 85% de borra oleosa de petróleo e 15% de borracha de pneus. Este estudo pelo processo de via seca modificou 10% do CAP 50/70 pela mistura dos dois resíduos industriais M1, este mesmo teor de CAP 50/70 modificado por M1 foi o utilizado na pesquisa de Santana (2015) pelo processo via úmida.

Neste estudo pelo processo de via seca foram realizadas dosagens nas metodologias Marshall e Superpave para definir o teor de ligante de projeto e os resultados coincidiram com o teor de ligante de projeto da pesquisa de Santana (2015). Portanto nesta pesquisa tanto para dosagem Marshall quanto para a dosagem Superpave foi utilizado o mesmo teor de ligante de

projeto do estudo realizado por Santana (2015) pelo processo de via úmida, ou seja, 6,1% para dosagem Marshall e 5,7% para dosagem Superpave. Os métodos de ensaios utilizados foram os descritos nas normas aprovadas pela Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) e pelo Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT). Também foi realizado uma pesquisa bibliográfica em livros, periódicos e artigos científicos, sendo este trabalho dividido em três etapas: 1. Caracterização dos materiais utilizados; 2. Dosagens; 3. Ensaios mecânicos realizados nas misturas asfálticas. Os resultados alcançados nas etapas citadas anteriormente serviram de referência para as conclusões desta pesquisa, e ainda, como também sugestões para trabalhos futuros.

Para assegurar melhor esclarecimento é apresentado um fluxograma do procedimento de caracterização dos materiais, dosagens e dos ensaios mecânicos realizados (Figura 11).

Figura 11 - Fluxograma do procedimento de caracterização dos materiais, dosagem e dos ensaios mecânicos realizados



### 3.2.1 Caracterização dos materiais

É de suma importância especificar todos os materiais utilizados nas misturas asfálticas, realizando toda a análise de caracterização destes materiais e se os resultados obtidos estão de acordo com o recomendado em normas técnicas, dessa forma é possível saber se os mesmos são adequados para produzir as misturas asfálticas. O CAP (Cimento Asfáltico de Petróleo) foi caracterizado quanto à resistência a penetração, ponto de amolecimento e massa específica. Análise reológica de viscosidade do CAP 50/70 foi realizada por meio de reômetro de cisalhamento dinâmico (DRS) na temperatura máxima de uso do pavimento e por meio de viscosímetro de Brookfield na temperatura de processamento do concreto asfáltico.

Inicialmente a borracha de pneus foi peneirada na peneira de 0,500 mm, em seguida lavada em água corrente para retirar as impurezas e por fim seca em estufa a 105° C. Para os agregados minerais foram realizadas caracterizações através dos ensaios de análise granulométrica, massa específica, absorção, índice de forma, abrasão Los Angeles e adesividade, todos realizados em laboratório. O desempenho que os agregados oferecem aos revestimentos asfálticos tem relação com as propriedades que eles possuem. Diante disso, os ensaios de caracterização de análise granulométrica, massa específica, absorção, índice de forma, abrasão Los Angeles e adesividade foram à predição para a seleção dos agregados.

Os ensaios de caracterização dos agregados foram executados no GEOPAV/DEC/UFS e do resíduo de recauchutagem de pneus no laboratório do GPDCMat. A dosagem Superpave e os ensaios mecânicos foram realizados no Laboratório de Engenharia de Pavimentos (LEP) na Universidade Federal de Campina Grande (UFCG).

#### **A - Caracterização física**

##### *A1 - Ensaio de penetração do CAP 50/70 puro*

Devido aos diversos tipos de asfaltos brasileiros o ensaio de penetração permite conhecer o intervalo de profundidade do ligante asfáltico e, dessa maneira, classificar esse CAP para suas possíveis aplicações nos revestimentos asfálticos. Este ensaio é regulado pela norma DNIT-ME 155/2010 e determina a medida de penetração à temperatura de 25°C em

uma amostra de CAP. A leitura é realizada em décimos de milímetros de penetração de uma agulha, no qual a carga total aplicada seja de 100 gramas no intervalo de 5 segundos. A leitura final para esta pesquisa foi a média de três leituras de penetração (Figura 12). A depender da classificação desse asfalto se confirma através do ensaio de penetração se os resultados das leituras estão no intervalo de profundidade recomendado em norma técnica.

Figura 12 - Ensaio de penetração do CAP puro



#### *A2 - Análise granulométrica dos agregados*

Os agregados são responsáveis pelo esqueleto mineral da mistura asfáltica que proporcionam estruturas duráveis durante sua vida de serviço. Para que de fato isso ocorra deve-se conhecer, analisar e selecionar todas as propriedades que os agregados possuem. A análise granulométrica dos agregados é uma das principais características que influencia de fato no comportamento dos revestimentos asfálticos, essa propriedade interfere em quase todas as propriedades relevantes da mistura asfáltica (BERNUCCI et al. 2006). Para Cruz (2018) os agregados graníticos, por ser reconhecido de maneira nacional, é o agregado mais recomendado para ser utilizados em misturas asfálticas, e que a análise granulométrica desses

agregados tem papel fundamental para produzir um revestimento asfáltico que tenha resistência aos impactos gerados pelo tráfego.

Inicialmente foram coletadas as amostras conforme a norma DNER PRO-120/97, em seguida essas amostras foram reduzidas de acordo com a especificação DNER PRO-199/96. A análise granulométrica foi realizada conforme norma DNER-ME 083/98. Os agregados selecionados foram graníticos denominados de graúdo, intermediário e pó de pedra (fíler) (Figura 13).

Figura 13 - Agregados graúdo, intermediário e pó de pedra (fíler)



### *A3 - Massa específica e absorção dos agregados*

É relevante realizar os ensaios de massa específica e absorção, pois segundo Bernucci et al. (2006), existem relações entre a quantidade de massa e o volume dos materiais. Estas relações denominadas massas específicas é de uso comum na engenharia também é conhecido como densidade. Segundo Cruz (2018), este ensaio tem como finalidade conhecer a massa da unidade de volume do agregado, excluindo os vazios entre os grãos e os poros permeáveis, calculando como se o agregado fosse um corpo inteiramente maciço. Já para o ensaio de absorção estar relacionado com a porosidade de um agregado, conhecer o grau de porosidade de um agregado implica em prevenir que um agregado poroso absorva ligante asfáltico, conseqüentemente não comprometendo o comportamento da mistura asfáltica.

Para o ensaio de determinação de massa específica e absorção dos agregados graúdos e intermediários foi utilizada a norma DNER 195/97. Primeiramente, o agregado graúdo foi lavado na peneira de 4,75mm (nº. 4) e, logo em seguida, imerso em água por um período de

24 horas. Após esse período o agregado foi retirado da água e enxuto para obter a condição de superfície saturada seca, em seguida o material foi pesado submerso em água. A última etapa deste ensaio foi levar o material para estufa na temperatura de 105°C onde permaneceu por um período de 24 horas e foi medida sua massa seca.

A massa específica real, aparente e a absorção foram calculadas conforme as Eq. 5, eq. 6 e eq. 7, respectivamente.

$$G_{sa} = \frac{M_s}{M_s - M_i} \times \delta t \quad \text{eq. 5}$$

$$G_{sb} = \frac{M_s}{M_h - M_i} \times \delta t \quad \text{eq. 6}$$

$$S = \frac{M_h - M_s}{M_s} \times 100 \quad \text{eq. 7}$$

Em que:

$D_i$  - Massa específica real (g/cm<sup>3</sup>);

$D$  - Massa específica aparente (g/cm<sup>3</sup>);

$S$  - Absorção dos agregados;

$M_s$  - Massa do agregado seco em estufa;

$M_i$  - Massa da amostra submersa;

$M_h$  - Massa da amostra na condição de superfície seca saturada;

$\delta t$  - Massa específica da água na temperatura de pesagem na balança hidrostática.

Os agregados classificados como intermediário, por terem menos de 12% do material passando na peneira de n°4, tiveram sua massa específica definida da mesma forma que a massa específica para agregados graúdos. Já o agregado de pó de pedra por ter predominância passante na peneira n°4 teve sua massa específica ensaiada pelo método do frasco de Chapman. A norma DNER-ME 194/98 foi à base de cálculo da massa específica real do pó de pedra. O pó de pedra passado na peneira 4,75 mm (n°. 4) foi seco em estufa até atingir constância de massa e em seguida colocado 500 g do material no frasco de Chapman com 200 ml de água (Figura 14). O resultado da massa específica foi dada pela equação 8.

Figura 14 - Determinação da massa específica real do pó de pedra pelo método do frasco de Chapman



$$\gamma = \frac{500}{L - 200} \quad \text{eq. 8}$$

Em que:

L - volume total da amostra do agregado mais a água, cm<sup>3</sup>

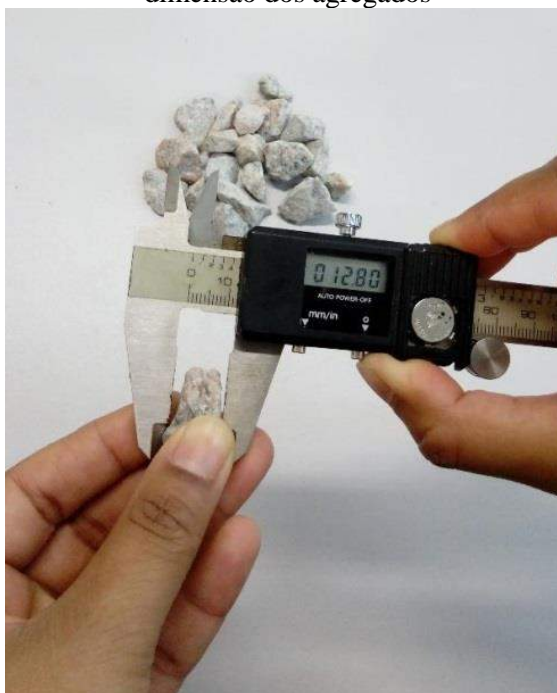
$\gamma$  - massa específica real, g/cm<sup>3</sup>

*A4 - Índice de forma dos agregados*

Segundo Bernucci et al. (2006), a forma das partículas influencia na trabalhabilidade como também na resistência ao cisalhamento das misturas asfálticas. Só através dos resultados desse ensaio é possível avaliar a angularidade e a cubicidade das partículas. O índice de forma de um agregado graúdo é dado pela relação entre a maior e menor medida do agregado e é especificado pela NBR 7908/2006, conforme mostrado na Figura 15. Este ensaio

tem como objetivo medir a angularidade dos agregados graúdos onde as dimensões máximas características sejam maiores que 9,5mm.

Figura 15- Determinação do índice de forma através da dimensão dos agregados



O índice de forma é dado pela medida de 200 grãos retidos nas peneiras igual e superior a 9,5mm. Através de um paquímetro medem-se três dimensões das partículas dos agregados: comprimento (a), largura (b) e espessura (c) e determinadas as razões  $b/a$  e  $c/b$ .

#### *A5 - Desgaste por Abrasão Los Angeles*

Durante a execução de misturas asfálticas e também durante a execução do tráfego, os agregados estão propícios a quebras por abrasão, por isso é importante conhecer o quanto esses agregados resistem à abrasão. Este ensaio tem como norma, a 035/98 do DNER-ME. O ensaio de abrasão Los Angeles tem como finalidade, medir quanto o agregado sofreu desgaste provocado pelas esferas de aço inseridas dentro do equipamento Los Angeles junto ao



agregado, ambos sob um determinado número de rotações (Figura 16). O valor esperado para este ensaio é entre o intervalo de 40 e 55%.

Através da norma, a graduação adotada para o agregado graúdo foi a B. Sendo assim, foram selecionados 2500 g de agregados passantes na peneira 19 mm e retido na 12,5 mm e 2500 g de agregados passantes na peneira 12,5 mm e retidos na peneira 9,5 mm. Já para o agregado classificado como intermediário, foi adotada a faixa de graduação C. Dessa maneira, foram selecionados 2500 g de amostra passante na peneira 19 mm e retidos na peneira 6,3 mm, e 2500g de agregados passantes na peneira 6,3 mm e retidos na 4,8 mm.

Figura 16 - Equipamento Los Angeles e esferas abrasivas



## **B - Caracterização físico - química do CAP 50/70**

### *B1 - Ponto de Amolecimento*

As propriedades físicas do ligante asfáltico estão relacionadas com a temperatura e a condição de escoamento. É medida através do ensaio de ponto de amolecimento, ou seja, é

importante para estimar a suscetibilidade térmica desse ligante. Esse ensaio também é conhecido como “anel e bola” e é regulamentado pela norma 131/2010 DNIT. O ponto de amolecimento mede a temperatura na qual o CAP amolece e atinge um determinado escoamento. Dessa forma é possível conhecer se os resultados do ponto de amolecimento a depender da classe do CAP.

O ensaio consiste na colocação do CAP em dois moldes metálicos de dimensões padronizadas e sobre estes duas esferas metálicas também com dimensões e pesos padronizados. Todo o conjunto é colocado dentro de um béquer com água e aquecidos a uma variação de 5° C por minuto. O ponto de amolecimento é a temperatura média marcada no instante que as duas esferas tocam a placa do fundo do conjunto. A média das temperaturas não devem exceder 2° C (Figura 17).

Figura 17 - Equipamento de medida do ponto de amolecimento de ligante



## C - Caracterização química

### *C1 - Adesividade*

A água tem efeito de descolar a película de ligante da superfície do agregado e comprometer o comportamento da mistura asfáltica. Diante disso, é necessário realizar o ensaio de adesividade e esperar resultados onde não ocorra esse descolamento. Esse método de ensaio determina a adesividade do ligante asfáltico ao agregado e é normatizado pelo norma 078/98 do DNER-ME. O ensaio é realizado ao misturar 500 g de agregado passantes na peneira de abertura de 19 mm e retido na peneira 12,7 mm, com 17,5 g de ligante. A mistura agregado e ligante é colocado em um becker com água e mantido por 72 horas na estufa com temperatura de 40°C (Figura 18).

Se não houver descolamento nas próximas 72 horas é considerado uma boa adesividade entre o ligante e o agregado. A degradação da mistura asfáltica surge de maneira mais rápida quando essa adesividade ligante agregado é baixa, ou seja, há o descolamento da película de ligante do agregado.

Figura 18 - Ensaio de adesividade



#### **D - Dosagens das misturas asfálticas com CAP 50/70 modificado com M1 pelo processo de via seca**

Nesta pesquisa foram realizados dois tipos de dosagens: Marshall e Superpave nível 1 (baseados em parâmetros volumétricos).

## D 1 - Dosagem Marshall

Mesmo que diversas formas de compactação venham sendo desenvolvidas, o método de dosagem Marshall ainda é o mais utilizado no Brasil. Na dosagem Marshall o cálculo da densidade máxima teórica (DMT) foi realizado pela ponderação das massas específicas de todos os materiais que constituem a mistura asfáltica, de acordo com a equação 9. Através da DMT é possível calcular os parâmetros volumétricos de volume de vazios, vazios com betume, vazios do agregado mineral e relação betume/vazios.

$$DMT = \frac{100}{\frac{\%a}{Ga} + \frac{\%Ag}{GAg} + \frac{\%Ai}{GAi} + \frac{\%Pó}{GPó}} \quad \text{eq. 9}$$

Em que:

%a, %Ag, %Ai, %Pó – são respectivamente, porcentagem de asfalto, agregado graúdo, agregado intermediário e pó de pedra presente na mistura;

Ga, GAg, GAi, GPó - respectivamente, massa específica do ligante e massas específicas reais do agregado graúdo, agregado intermediário e pó de pedra presente na mistura.

No Brasil, além da DMT, também é utilizado a densidade máxima medida (Gmm) que é obtida através da massa específica diretamente da mistura asfáltica e não para cada material da mistura asfáltica, como acontece na DMT. A densidade máxima medida (Gmm) também é denominada como densidade específica Rice. Esse método não existe na norma brasileira que descreva essa metodologia, sendo assim, são baseados em normas americanas ASTM D 2041 (2000) e a AASHTO T 209 (1994). A Gmm é determinada pela equação 10, sendo:

$$Gmm = \frac{M_{seco}}{M_{seco} - M_{imerso}} \quad \text{eq. 10}$$

Onde:  $M_{seco}$ : Massa do corpo de prova seco ao ar;

$M_{imerso}$ : Massa do corpo de prova submerso ( $\text{g/cm}^3$ ).

Vasconcelos e Soares (2015) afirmaram que o teor de projeto de ligante pouco variam quando utilizados densidade máxima teórica (DMT) e densidade máxima medida (Gmm), referente às normas brasileiras ou americanas com misturas asfálticas de graduação contínua.

Após obter as massas específicas dos agregados e do ligante asfáltico, o teor inicial para confecção foi de 5% de ligante como recomendado em norma. Em seguida, foram confeccionados 3 corpos de provas para cada teor de ligante, sendo os teores: 4,0%, 4,5%, 5,0%, 5,5% , 6,0% e 6,5%, totalizando 18 corpos de provas. As temperaturas de mistura e de compactação foram definidas a partir da curva de viscosidade versus temperatura do CAP em estudo. A temperatura de mistura do ligante e dos agregados estão descritos na Tabela 4.

Tabela 4 - Temperaturas de processamento da mistura			
	Ligante (°C)	Agregado (°C)	Compactação (°C)
CAP 50/70	155	165	142

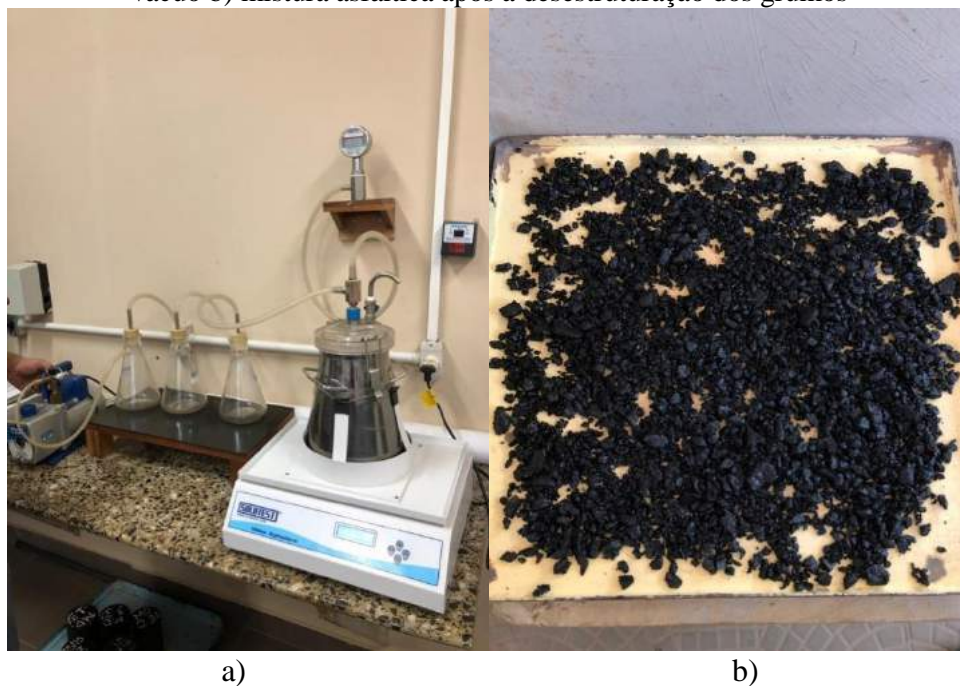
Durante o processo de compactação cada face do corpo de prova foi compactado 75 vezes automaticamente. Em seguida, esses corpos de prova foram deixados em temperatura ambiente para resfriamento e, assim, realizadas medidas de altura e diâmetro. A próxima etapa foi realizar os pesos de massa seca massa ( $M_s$ ) e massa submersa ( $M_{ss}$ ), com esses valores é possível obter os parâmetros volumétricos. O teor de ligante adotado foi a média dos dois teores centrais a partir dos quatro teores limites de Vv (volume de vazios) e RBV (relação betume/vazios).

## *D 2- Dosagem Superpave*

A dosagem Superpave é importante, pois visa estimar o teor de projeto através do volume de vazios fixo como também a forma de escolha dos agregados da mistura granulométrica. Na dosagem Superpave utiliza-se a densidade máxima medida (Gmm) que foi obtida pelo método Rice, como especificado pela norma americana ASTM D 2041. Para o teste, inicialmente foi necessário definir as massas específicas das misturas, eliminando os seus volumes de vazios, na qual foram preparadas duas misturas para cada teor de ligante adotado. Os grumos maiores só foram desestruturados após 24 horas em temperatura

ambiente e colocados em kitassato de massa previamente medida, logo após colocou-se água e foi aplicado uma pressão vácuo de 730 mm Hg durante 15 minutos, as leituras foram feitas com o kitassato completo de água e com a mistura solta mais água (Figura 19).

Figura 19- Determinação do Gmm densidade máxima medida a) Eliminação de ar pela aplicação de vácuo b) mistura asfáltica após a desestruturação dos grumos



A Gmm foi determinada pela equação 11:

$$Gmm = \frac{A}{A + B - C} \times 0,99 \quad \text{eq. 11}$$

Em que:

A - massa da amostra seca

B - massa do kitassato completo com água

C - massa do kitassato com a amostra e completo com água

Através das recomendações da dosagem Marshall foram definidas as temperaturas do ligante e dos agregados para mistura asfáltica, como também para compactação dos corpos de

prova. Nesta pesquisa foi abordado apenas o nível 1 da dosagem Superpave, que se baseia em parâmetros volumétricos. Portanto, para 100 giros buscou-se um volume de vazios de 4%. A densidade máxima medida dos corpos de prova versus número de giros inicial, foi ( $N_i=8$ ) e final ( $N_f=160$ ). Para referência do tráfego foi adotado o equivalente de carga por eixo padrão (*Equivalent Standard Axle Load* – ESAL) o valor maior que  $3 \times 10^6$  e menor que  $30 \times 10^6$  (Tabela 5).

Tabela 5 - Parâmetros volumétricos adotados para dosagem Superpave

ESAL ( $\times 10^6$ )	%Gmm			VAM mínimo (%)	RBV (%)	Relação pó ligante
	$N_i$	$N_p$	$N_f$			
3 - 30	$\leq 89$	96	$\leq 98$	14	65 - 75	0,6 - 1,2

Em que:

Gmm – densidade máxima medida

VAM - volume agregado mineral

RBV – relação betume vazios

Inicialmente foram produzidos no compactador giratório Superpave (CGS) 12 corpos de prova, sendo 2 amostras para cada teor de ligante: 4,0%, 4,5%, 5,0%, 5,5%, 6,0% e 6,5%. Foram aplicados 100 giros para cada teor de mistura com o ligante modificado com M1 pelo processo de via seca. No propósito de simular o tempo de envelhecimento do ligante modificado com M1, da mesma maneira que ocorre em usinas industriais, as misturas asfálticas deste estudo foram mantidas por duas horas em estufa, sem circulação de ar e na temperatura de compactação de 142°C. As etapas realizadas para obtenção dos corpos de prova são apresentadas nas Figuras 20 (a, b, c, d, e, f).



Figura 20 - Confeção dos corpos de prova: a) incorporação de ligante ao agregado b) mistura c) colocação no molde Superpave d) e e) Compactação f) Corpos de prova



a)



b)



c)



d)





e)



f)

Para o cálculo da densidade aparente dos corpos de prova foram a partir da massa seca e massa submersa do corpos de prova, equação 12.

$$G_{mb} = \frac{M_s}{M_s - M_{sub}} \times 0,9971 \quad \text{eq.12}$$

Em que:

$M_s$  - massa seca do corpo de prova (g);

$M_{sub}$  - massa submersa do corpo de prova (g).

Para os cálculos dos parâmetros volumétricos tiveram como base as equações presentes no manual para projeto de misturas asfálticas a quente (NCHRP, 2011). Equações 13 a 19.

$$V_v = 100 \times \left[ 1 - \left( \frac{G_{mb}}{G_{mm}} \right) \right] \quad \text{eq. 13}$$

$$V_{AM} = 100 - \left[ \frac{G_{mb} \times P_s}{G_{sb}} \right] \quad \text{eq. 14}$$

$$RBV = \left[ \frac{V_{AM} - V_v}{V_{AM}} \right] \times 100 \quad \text{eq. 15}$$

$$Gse = \frac{Ps}{\frac{100}{Gmm} - \frac{Pb}{Gb}} \quad \text{eq. 16}$$

$$Pba = \left[ \frac{(Gse - Gsb)}{(Gse \times Gsb)} \right] \times Gb \times 100 \quad \text{eq. 17}$$

$$Pbe = Pb - \left( \frac{Pba \times Ps}{100} \right) \quad \text{eq. 18}$$

$$\text{Relação } \frac{P(200)}{\text{ligante}} = \frac{P200}{Pbe} \quad \text{eq. 19}$$

Em que:

Vv - volume de vazios (%);

Gmb - massa específica aparente do corpo de prova ( $\text{g/cm}^3$ );

Gmm - densidade máxima medida da mistura solta ( $\text{g/cm}^3$ );

VAM- vazios nos agregados minerais (%);

Ps - Porcentagem de agregado na mistura (%);

Gsb - massa específica aparente dos agregados ( $\text{g/cm}^3$ );

RBV - relação betume por vazios (%);

Gse - massa específica aparente dos agregados ( $\text{g/cm}^3$ );

Pb - porcentagem de ligante na mistura (%);

Gb - massa específica do ligante ( $\text{g/cm}^3$ );

Pba - porcentagem de ligante absorvido (%);

Pbe - Porcentagem efetiva de ligante (%);

P200 - porcentagem de agregado que passa na peneira n°. 200.

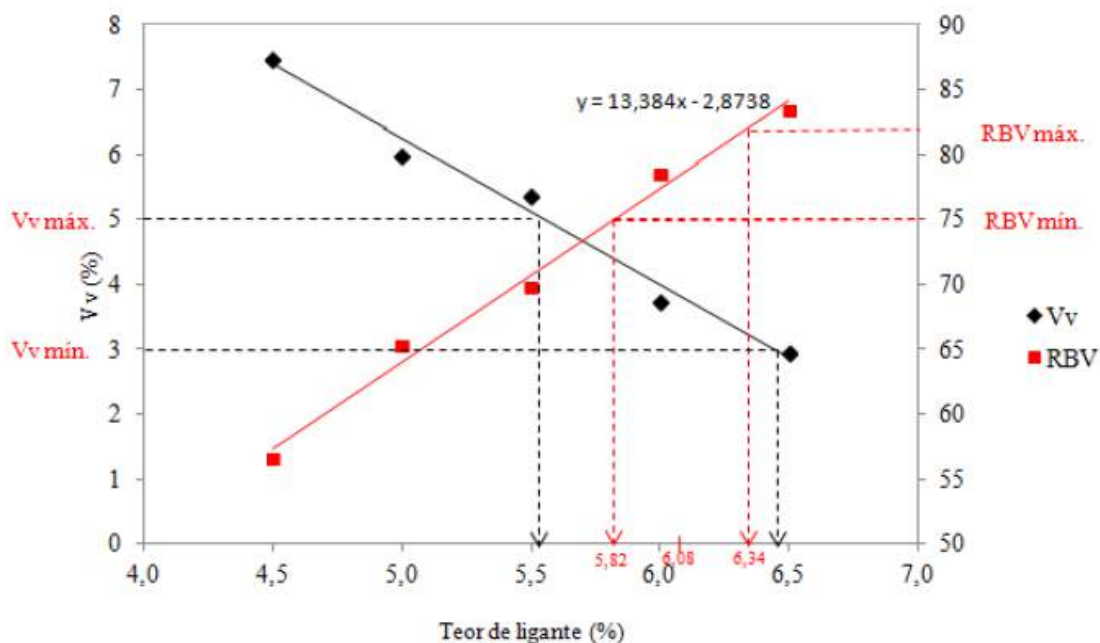
Após verificar os parâmetros volumétricos dos corpos de prova traçou-se o gráfico teor de ligante versus volume de vazios, dessa maneira encontrou-se o teor de projeto de ligante para um volume de vazios de 4%. Após definir o teor de ligante de projeto, novos corpos de prova foram moldados com 8, 100 e 160 giro; 2 corpos de prova para cada giro totalizando 6 corpos de prova. Logo após foram determinadas as massas específicas secas e submersas desses corpos de prova e, em seguida, calculados seus parâmetros volumétricos. Após as determinações das massas específicas aparente dos corpos de prova moldados 8 e 160 giros, foi possível calcular o percentual de compactação em relação densidade máxima medida.

## E - Determinação do teor do CAP 50/70 modificado com M1 pelo processo de via úmida de Santana (2015)

### E 1 - Dosagem Marshall

A Figura 21 é o gráfico do teor de ligante de projeto de Santana (2015) pelo processo de via úmida. O teor de ligante de projeto encontrado por Santana (2015) para a dosagem Marshall foi de 6,1%. Por ser uma pesquisa comparativa nos dois estudos, tanto para o processo via seca quanto para o processo via úmida foi utilizado o mesmo CAP 50/70 e o M1 como agente modificador do ligante asfáltico.

Figura 21 – Determinação do teor de CAP 50/70 modificado com M1 para dosagem Marshall



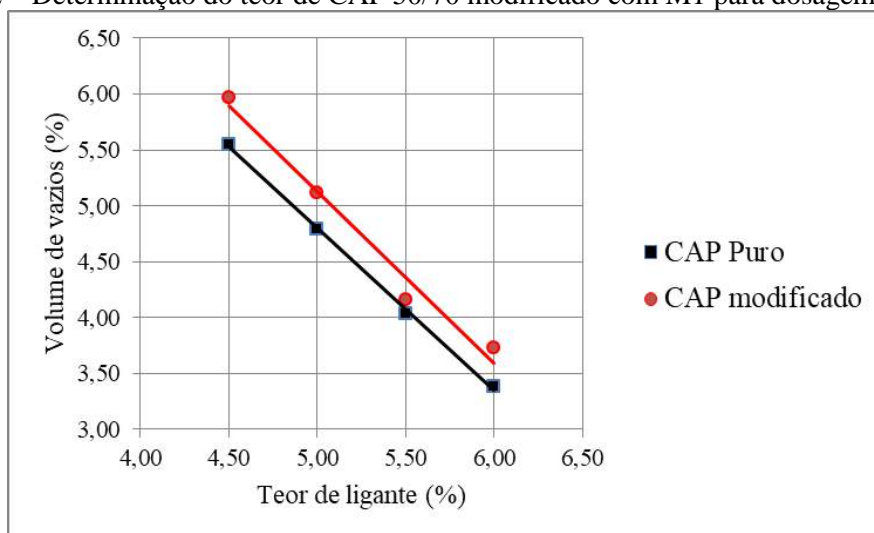
Fonte: Santana (2015)

O teor de ligante de projeto encontrado por Santana (2015) é semelhante ao encontrado por Graça, Cardoso e Cavalcante (2016) que foi 6,3%, ambos utilizaram agregados da mesma região. Soares et al. (2000) ressaltaram que as dosagens encontradas através dos parâmetros volumétricos não garantem que o teor de projeto será o teor mais adequado referente ao comportamento mecânico de uma mistura asfáltica. Dessa maneira deve-se considerar o tipo de CAP disponível e a aplicação final da mistura na estrutura do pavimento.

## E 2 - Dosagem Superpave

A metodologia de dosagem Superpave, assim como a dosagem Marshall, também considera parâmetros volumétricos após a compactação dos corpos de prova, sendo eles: volume de vazios ( $V_v$ ), volume agregado mineral (VAM) e relação betume vazios (RBV). A Figura 22 representa as variações do volume de vazios das misturas asfálticas modificadas com M1 em função do teor de ligante do estudo por via úmida de Santana (2015). Assim como ocorre na dosagem Marshall, o valor de referência de volume de vazios ( $V_v$ ) adotado pela dosagem Superpave é 4%. Para o CAP 50/70 modificado com M1 pelo processo de via úmida, o teor de ligante foi de 5,7%.

Figura 22 – Determinação do teor de CAP 50/70 modificado com M1 para dosagem Superpave



Fonte: Santana (2015)

## 3.3 ENSAIOS MECÂNICOS

### A - Estabilidade Marshall

O ensaio de estabilidade Marshall é especificado pela norma DNIT ME 043/95. Tem como objetivo conhecer o valor da estabilidade que mede de maneira indireta o intertravamento e a coesão entre as partículas da mistura asfáltica. Os corpos de prova cilíndricos de mistura asfáltica, foram colocados na temperatura de 60°C em um banho-maria

durante 30 minutos, após esse período foram ajustados no molde de ruptura e transportados à prensa Marshall (Figura 23).

Na prensa Marshall foram submetidos à carga de compressão a uma velocidade de carregamento de 5cm/min até o rompimento do corpo de prova. A estabilidade Marshall é a carga máxima correspondente expressa em unidade de força, expresso em Kgf. O resultado final foi dado através da média de pelo menos três resultados e como especificado em norma, o valor que se deseja atingir é no mínimo 500kgf.

Figura 23 - Ensaio de estabilidade Marshall



#### ***B - Resistência à tração por compressão diametral (RTCD)***

Segundo Bernucci et al. (2006) a resistência à tração por compressão diametral é um ensaio de parâmetro importante para caracterização mecânica de misturas asfálticas. Este ensaio segue os procedimentos da norma DNIT ME 136/2010 e determina a tensão máxima que a mistura asfáltica suporta antes da sua ruptura. O ensaio considera a aplicação de duas forças diametralmente opostas, comprimindo um corpo de prova cilíndrico que ocasionam tensões de tração perpendiculares a esse diâmetro; essas forças são ocasionadas através de

dois frisos metálicos (Figura 24). Os corpos de prova de mistura asfáltica foram submetidos a um carregamento com velocidade de  $0,8 \pm 0,1$  mm/s, até sua ruptura.

Figura 24 - Ensaio de resistência à tração por compressão diametral



A resistência à tração foi determinada pela equação 20:

$$\sigma_R = \frac{2F}{\pi DH} \quad \text{eq. 20}$$

Em que:

$\sigma_R$  – resistência à tração, MPa;

F – carga de ruptura, N;

D – diâmetro do corpo-de-prova, mm;

H – altura do corpo-de-prova, mm.

O resultado final da resistência à tração foi a média de pelo menos três resultados, em MPa. Segundo a norma DNIT ME 136/10 o valor esperado para este ensaio é de no mínimo 0,65 MPa.

### ***C - Lottman – Dano por umidade induzida***

Este ensaio é importante, pois está relacionado à adesividade ligante agregado por ação da água. O ensaio foi realizado de acordo com a norma ASTM D4867 com o objetivo de avaliar os danos causados nas misturas asfálticas causados pelos efeitos da umidade nos corpos de prova, submetendo os corpos de prova à ação de aquecimento e ciclos de degelo. A norma resume-se em produzir 8 corpos de prova sendo divididos em dois grupos: condicionados e não condicionados.

Para este ensaio a norma determina como parâmetro  $7\% \pm 0,5\%$  de volume de vazios, logo para atingir este valor foram necessários 12 golpes por face para dosagem Marshall e 15 giros para dosagem Superpave. O grupo submetido ao condicionamento foi colocado em um recipiente com água e aplicou-se vácuo até obter grau de saturação entre 70 e 85%, logo após cada procedimento o corpo de prova foi colocado em um saco plástico com 10ml de água, foram vedados e levados em seguida ao congelamento  $-18^{\circ}\text{C}$  durante 16 horas. Após esse período os mesmos corpos de prova foram mergulhados em água a  $60^{\circ}\text{C}$  pelo período de 24 horas. Terminado esse período, o grupo condicionado tiveram suas temperaturas reguladas para  $25^{\circ}\text{C}$ , em seguida, foram retirados dos sacos plásticos e realizado o ensaio de resistência à tração na prensa Marshall.

O grupo não condicionado também teve sua temperatura regulada a  $25^{\circ}\text{C}$  e logo em seguida também submetidos ao ensaio de resistência à tração na prensa Marshall. O dano por umidade induzida é a razão da resistência à tração, denominado de RRT, este é a razão entre a resistência à tração de corpos de prova condicionados (RTu) e resistência à tração de corpos de prova não condicionados (RT). As Figuras 25 (a, b, c, d) mostram as etapas de realização desse ensaio em laboratório. Segundo a norma, resultados são ditos satisfatórios quando o valor de RRT atingir o limite mínimo de 70%.



Figura 25 - Ensaio de dano por umidade induzida: a) saturação dos corpos de prova; b) colocação dos corpos de prova em sacos plásticos; c) acondicionamento em  $-18^{\circ}\text{C}$ ; d) acondicionamento a  $60^{\circ}\text{C}$



a)



b)



c)



d)

#### ***D - Módulo de resiliência (MR)***

O ensaio de módulo de resiliência para misturas asfálticas foi especificado pela norma 135/2010 do DNIT e realizado na Universidade Federal de Campina Grande (UFCG) no laboratório de engenharia de pavimentos através da prensa hidráulica UTM-25 da IPC (Figura 26). O ensaio consiste em uma carga compressiva em formato de onda que pulsa de forma



repetida no plano diametral vertical no corpo de prova cilíndrico e ocasiona uma tensão de tração transversal ao plano da aplicação. Dessa maneira sabe-se o deslocamento diametral recuperável na direção horizontal que corresponde à tensão gerada (BERNUCCI et al. 2006).

Figura 26 - Ensaio módulo de resiliência



## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

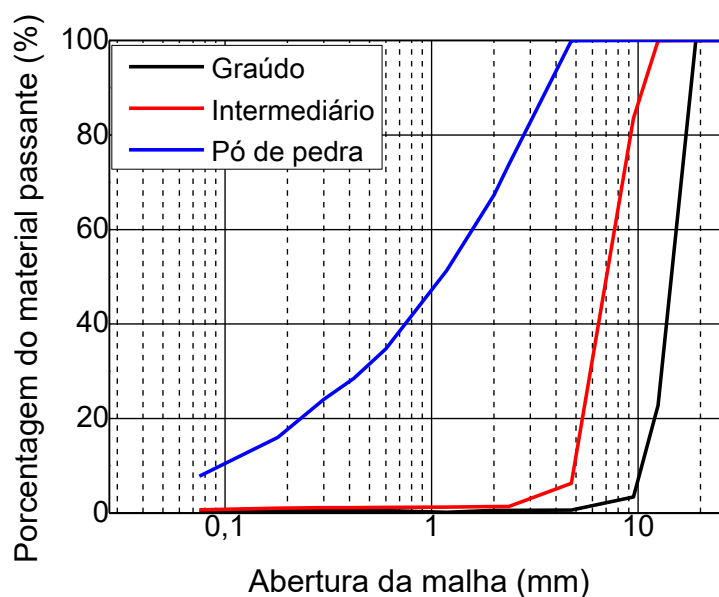
Neste capítulo são apresentados e analisados os resultados de caracterização dos componentes da mistura asfáltica e os ensaios de propriedades mecânicas da mistura asfáltica com ligante modificado por via seca, com os resíduos de borracha de pneu e borra oleosa de petróleo.

### 4.1 CARACTERIZAÇÕES FÍSICAS

#### 4.1.1 Análise granulométrica

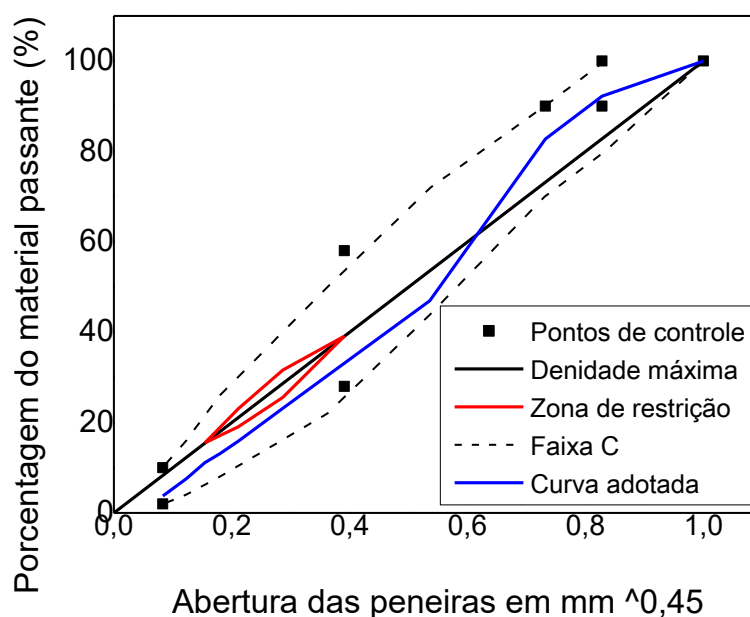
Para a distribuição granulométrica dos agregados utilizados, foram adotadas as porcentagens de 10%, 46% e 44% de agregado graúdo, intermediário e pó de pedra (fíler), respectivamente, para a mistura asfáltica do processo de via seca (Figura 27). Essa propriedade física é uma das mais importantes, pois assegura a estabilidade da mistura asfáltica e interfere em quase todas as propriedades importantes como durabilidade, permeabilidade, resistência à fadiga e deformação permanente.

Figura 27 - Curva granulométrica dos agregados utilizados na mistura asfáltica modificada com M1 pelo processo via seca



A Figura 28 mostra a curva adotada para a mistura asfáltica modificada pelo processo via seca. As porcentagens encaixam a distribuição granulométrica final dos agregados na faixa C do DNIT e para a metodologia Superpave entre os pontos de controle e fora da zona de restrição.

Figura 28 - Curva adotada e os limites da faixa C do DNIT e especificações do Superpave para a mistura asfáltica modificada com M1 pelo processo via seca



#### 4.1.2 Massa específica dos agregados

Na Tabela 6 encontram-se os resultados deste estudo e os encontrados por Santana (2015), ambos para a massa específica e absorção dos agregados. Os valores obtidos para as duas propriedades são semelhantes para os três tipos de agregados adotados e os resultados estão dentro dos valores limites especificados nas normas técnicas DNER 195/97 para agregado graúdo e intermediário e DNER-ME 194/98 para o pó de pedra (fíler).

Tabela 6 – Resultados dos ensaios de massa específica e absorção de água dos agregados

Agregados	Via seca			Via úmida Santana (2015)		
	Gsa (g/cm <sup>3</sup> )	Gsb (g/cm <sup>3</sup> )	Absorção (%)	Gsa (g/cm <sup>3</sup> )	Gsb (g/cm <sup>3</sup> )	Absorção (%)
Graúdo	2,647	2,650	0,330	2,727	2,685	0,573
Intermediário	2,605	2,597	0,722	2,682	2,633	0,696
Pó de pedra	2,659	2,673	0,240	2,655	2,639	0,234

Em que:

$G_{sa}$  – Massa específica seca;

$G_{sb}$  – Massa específica superfície saturada seca.

#### 4.1.3 Índice de forma

Os valores para o ensaio de índice de forma foram  $b/a = 0,77$  e  $c/b = 0,88$ , respectivamente, para as relações médias de largura (b), comprimento (a) e espessura. Portanto, o agregado graúdo foi classificado como cúbico, da mesma forma que o agregado de Santana (2015). Os agregados cúbicos são os mais recomendados, pois ajuda no intertravamento entre os graus.

#### 4.1.4 Abrasão Los Angeles

Quanto ao desgaste abrasão Los Angeles uma análise comparativa entre os dois estudos é mostrado na Tabela 7. Nesta pesquisa foi realizado o ensaio de abrasão Los Angeles também para o agregado intermediário diferentemente da pesquisa de Santana (2015). Diante dos resultados expostos, o agregado graúdo dos estudos por via úmida apresentou um maior desgaste quanto à abrasão, praticamente o dobro de desgaste encontrado nessa pesquisa. Porém, ambos se encontram abaixo dos limites máximos exigidos pela norma que é de 50%. Portanto, o desgaste sofrido pelos agregados nas duas pesquisas não influenciam no comportamento mecânico das misturas asfálticas, por apresentarem resultados dentro do limite especificado na norma 031/2006 do DNIT.

Tabela 7 - Resultados do ensaio de abrasão Los Angeles

Abrasão Los Angeles	Via seca	Via úmida Santana (2015)
Agregado graúdo (%)	11,75	23,4
Agregado intermediário (%)	13,06	-

#### 4.1.5 Caracterização do CAP 50/70

A Tabela 8 apresenta os resultados obtidos entre os dois estudos referente a caracterização do CAP 50/70. Diante disso pode-se concluir que estes ensaios de características físicas do CAP 50/70 não influenciam no comportamento mecânico das misturas asfálticas. O CAP 50/70 utilizado nas duas pesquisas atendem às especificações brasileiras de normas técnicas.

Tabela 8 - Resultados da caracterização do CAP 50/70

Características	Limite mínimo recomendado em norma	Via seca	Via úmida Santana (2015)
Penetração (0,1mm) NBR 6576/98	50 a 70	50	63,5
Ponto de amolecimento, mínimo (°C) – NBR 6560/2000	46	48	48,5
Grau de desempenho (PG), mínimo	60°C	64°	64°

## 4.2 CARACTERIZAÇÃO QUÍMICA

### 4.2.1 Adesividade

O ensaio de adesividade entre o CAP modificado e o agregado graúdo é uma análise qualitativa. Para esta pesquisa o ligante modificado pelo processo de via seca apresentou boa adesividade ligante agregado, assim como o resultado de Santana (2015) com ligante modificado por via úmida. Nas duas pesquisas não houve descolamento da película de ligante e agregado, apresentando boa adesividade (Figura 29).

Figura 29 - Ensaio de adesividade. a) Via úmida Santana (2015); b) Via seca



#### 4.2.2 Caracterização reológica em temperaturas de processamento

*Viscosidade do CAP 50/70 puro nas temperaturas 135°C, 150°C e 170°C.*

Os resultados obtidos referente a viscosidade do CAP estão dispostos na Tabela 9. Os valores são semelhantes para este estudo e Santana (2015) nas três temperaturas determinadas, em 135°C, 150°C e 175°C, e para as três temperaturas estão dentro dos limites recomendados em norma.

Tabela 9 - Caracterização reológica do CAP 50/70 puro

Características	Limite mínimo recomendado na norma NBR 15184	Via seca	Via úmida Santana (2015)
Viscosidade Brookfiel, 135°C, SP 21, rpm, mín (cP)	274	472	407,7
150°C, SP 21, rpm, mín (cP)	112	219	199,4
175°C, SP 21 rpm, mín (cP)	57 a 285	101	58,7

A Tabela 10 apresenta os parâmetros volumétricos da mistura asfáltica dentro dos limites exigidos pela metodologia Superpave utilizados pelo processo de via úmida de Santana (2015) e desta pesquisa pelo processo de via seca. Todos os resultados se encontram dentro dos limites recomendados na norma do DNIT 031/2006.

Tabela 10- Parâmetros volumétricos das dosagens, norma DNIT 031/2006, por via seca e via úmida

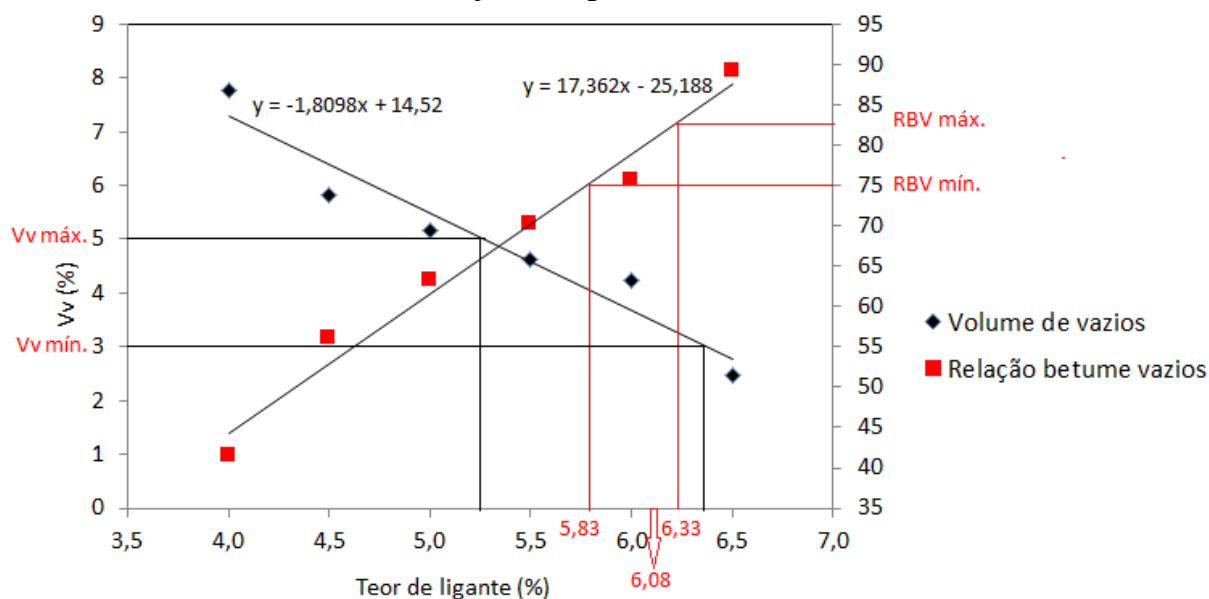
Características	Limite mínimo recomendado	Via seca	Via úmida Santana (2015)
VAM (%)	14,0	16,7	16,1
RBV (%)	65,0 - 75,0	74,7	74,9
P(200)/Pbe (%)	0,6-1,2	0,72	0,73

#### 4.3 DETERMINAÇÃO DO TEOR DO CAP 50/70 MODIFICADO COM M1 PELO PROCESSO DE VIA SECA

##### *Dosagem Marshall*

A Figura 30 representa o gráfico do teor de ligante de projeto Vv (%) versus RBV (%) da mistura asfáltica modificada com M1 que resulta no teor de ligante de projeto da dosagem Marshall para o processo de via seca. No gráfico estão todos os valores das linhas de tendência encontrados de Vv e RBV assim como também os limites específicos para esses dois parâmetros, 3% a 5% para volume de vazios e 75% a 82% para relação betume vazios. A partir da intercessão das linhas encontram-se quatro teores de ligante asfáltico, o teor ótimo é encontrado através da média dos dois teores centrais. O resultado mostrou que o teor de ligante de projeto coincidiu com o teor encontrado por Santana (2015), ou seja, de 6,1%.

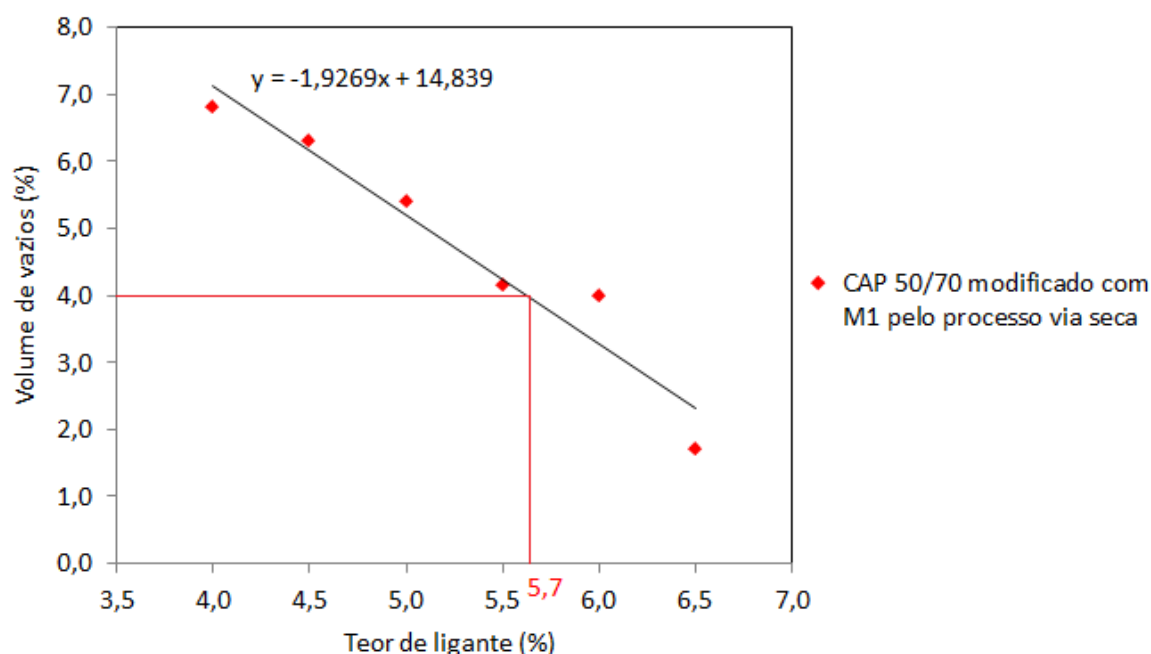
Figura 30 - Determinação do teor de CAP 50/70 modificado com M1 pelo processo via seca para dosagem Marshall



### *Dosagem Superpave*

O gráfico do teor de ligante de projeto para dosagem Superpave está representado na Figura 31. É um gráfico de Vv (%) versus RBV (%) e o teor ótimo de ligante é encontrado para um volume de vazios de 4%. Para o ligante asfáltico modificado com M1 processo via seca o teor de ligante de projeto encontrado para dosagem Superpave foi de 5,7%, o mesmo teor encontrado por Santana (2015) pelo processo via úmida.

Figura 31- Determinação do teor de CAP 50/70 modificado com M1 pelo processo via seca para dosagem Superpave



## 4.4 ENSAIOS MECÂNICOS

### *Estabilidade Marshall*

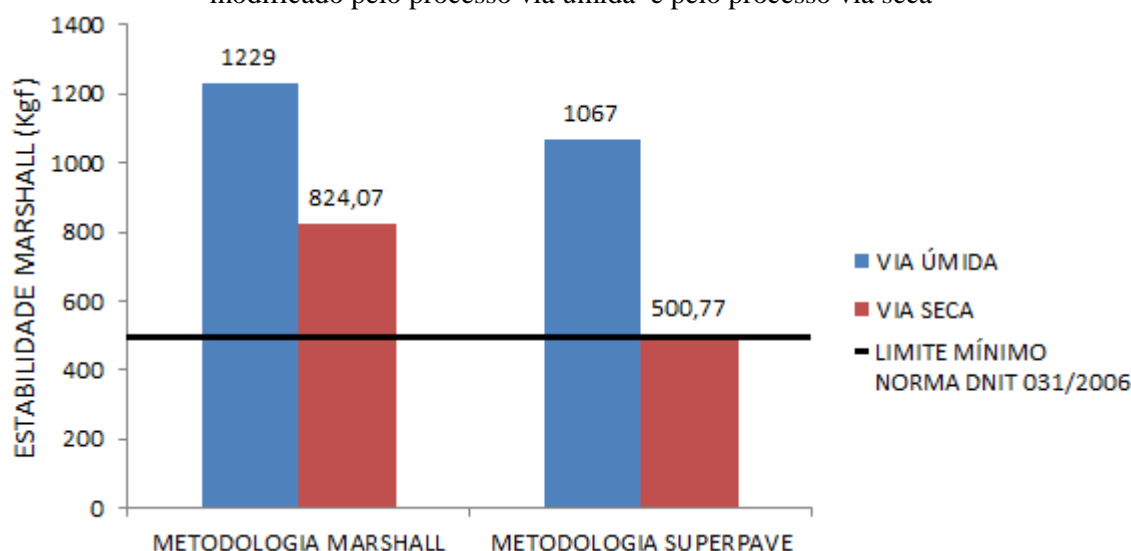
A estabilidade Marshall é definida através da norma DNER-ME 043/1995 que estabelece qual a carga máxima que o corpo de prova resiste antes de romper. Na Figura 32 são apresentados graficamente os resultados de estabilidade Marshall dos estudos de Santana (2015) para o CAP modificado com resíduo industrial M1 pelo processo de via úmida e os desta pesquisa com CAP modificado com resíduo industrial M1 pelo processo de via seca. Os



dois estudos apresentaram estabilidade Marshall superior a 500 kgf, esse valor é o limite mínimo estabelecido nas normas DNER-ME 043/1995 e 031/2006 do DNIT. Porém observando a variação dos resultados individuais das misturas asfálticas para o estudo por via seca, pode-se observar um aumento significativo da estabilidade na mistura asfáltica dosada pelo método Marshall, quando comparado ao método Superpave.

Os resultados das misturas asfálticas pelo processo via seca para o método Marshall e Superpave, apresentaram resultados inferiores quando comparados aos estudos por via úmida de Santana (2015). Como CAP 50/70 é modificado pelo processo de via seca adicionando-se o resíduo industrial M1 como agregado, possivelmente o processo de compactação por golpes utilizado na metodologia Marshall, tenha elevado de forma mais significativa o intertravamento entre os agregados (CASTELO BRANCO, 2004). O aumento dos valores de estabilidade Marshall ao adicionar borracha de pneus às misturas asfálticas também ocorreu nas pesquisas de Momm e Salini (2000) e Dias (2005). Portanto, de maneira geral, os resultados obtidos para esse ensaio mecânico de estabilidade na pesquisa pelo processo de via seca, satisfazem o limite mínimo recomendado em norma para os dois tipos de dosagem, tanto para dosagem Marshall quanto para dosagem Superpave.

Figura 32 – Resultados de estabilidade Marshall e Superpave de misturas asfálticas com ligante modificado pelo processo via úmida e pelo processo via seca



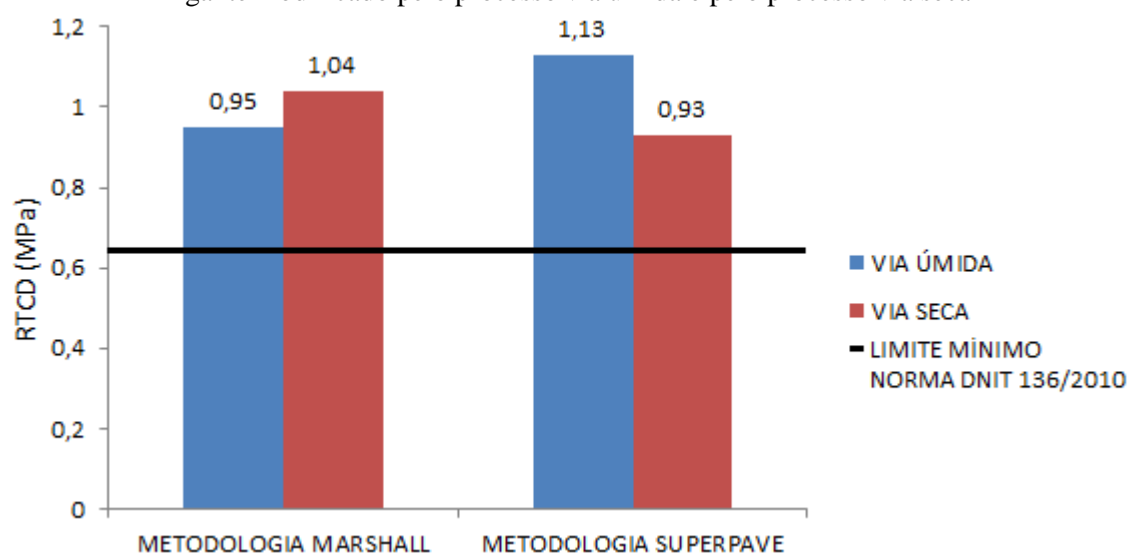
### ***Resistência à tração por compressão diametral***

Os resultados obtidos de resistência à tração por compressão diametral de cada tipo de dosagem pelo processo via seca e por via úmida de Santana (2015) estão representados na Figura 33. Analisando separadamente os corpos de prova pelo processo via seca, dosados pelo método Marshall, estes apresentaram resultados de resistência à tração por compressão diametral superiores quando comparados aos dosados pelo método Superpave. Resultados análogos foram obtidos por Cao (2007) quando analisou a resistência à tração em misturas asfálticas com ligante modificado por borracha de pneus também pelo processo de via seca.

É possível que o método de compactação por golpes tenha influencia no aumento de resistência à tração por compressão diametral dos corpos de prova. Na pesquisa de Graça, Cardoso e Cavalcante (2016) foram analisadas misturas asfálticas com ligante asfáltico modificado com resíduo industrial M1 pelo processo de via úmida dosado pelo método Marshall, os resultados mostraram valores superiores de resistência à tração por compressão diametral quando comparado ao CAP puro. Por outro lado, observa-se que nos estudos por via úmida de Santana (2015), o CAP modificado com o resíduo M1 através do método Superpave, obteve resultados superiores quando comparados ao método Marshall.

De maneira geral, conclui-se que quando adicionado borracha de pneus aos CAP 50/70 seja pelo processo de via úmida ou pelo processo via seca há uma diminuição do valor de resistência à tração por compressão diametral quando comparado ao CAP puro, resultados análogos aconteceram nas pesquisas de Cao (2007) e Dias (2005). Porém, para os dois estudos os valores apresentaram resistência à tração por compressão diametral superiores ao limite mínimo exigido pela norma 031/2006 DNIT que é de 0,65 MPa para misturas asfálticas na faixa “C”, cuja aplicação são para camadas de rolamento. Estes resultados encontram-se no intervalo de 0,8 a 2,0 MPa e são compatíveis com valores característicos das misturas asfálticas a quente recém-moldadas (BERNUCCI et al. 2006).

Figura 33 - Resultados de resistência à tração por compressão diametral de misturas asfálticas com ligante modificado pelo processo via úmida e pelo processo via seca

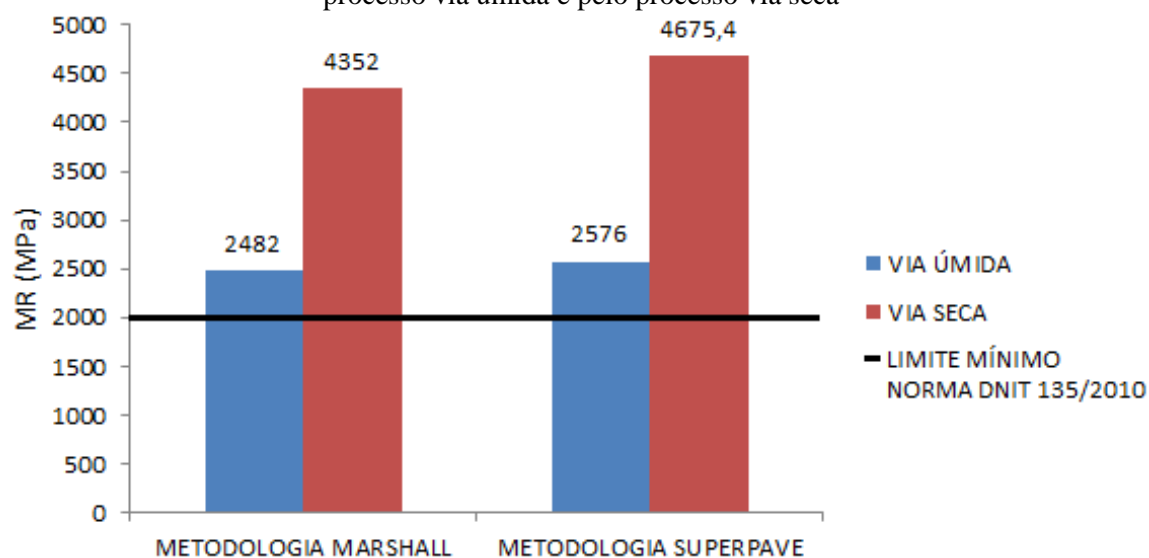


### ***Módulo de resiliência***

Para este ensaio de resistência mecânica, a força aplicada foi limitada a 10% da resistência à tração, caso contrário pode acontecer de o corpo de prova sofrer rompimento por fadiga durante o ensaio. Estão apresentados na Figura 34 os valores das misturas asfálticas moldadas na metodologia Marshall e Superpave pelo processo por via seca e pelo processo via úmida de Santana (2015). As amostras de ambas as pesquisas foram ensaiadas sob a temperatura de 25°C.

Observa-se na Figura 34 que as misturas asfálticas com ligante modificado pelo processo de via seca apresentaram valores de módulo de resiliência superiores quando comparados às misturas asfálticas de Santana (2015) moldados por via úmida. Analisando separadamente os corpos de prova da dosagem Superpave, este método obteve maiores resultados quando comparados ao método Marshall. A mistura asfáltica pelo processo de via seca do método Superpave obteve o maior valor de módulo de resiliência.

Figura 34 - Resultados de módulo de resiliência de misturas asfálticas com ligante modificado pelo processo via úmida e pelo processo via seca



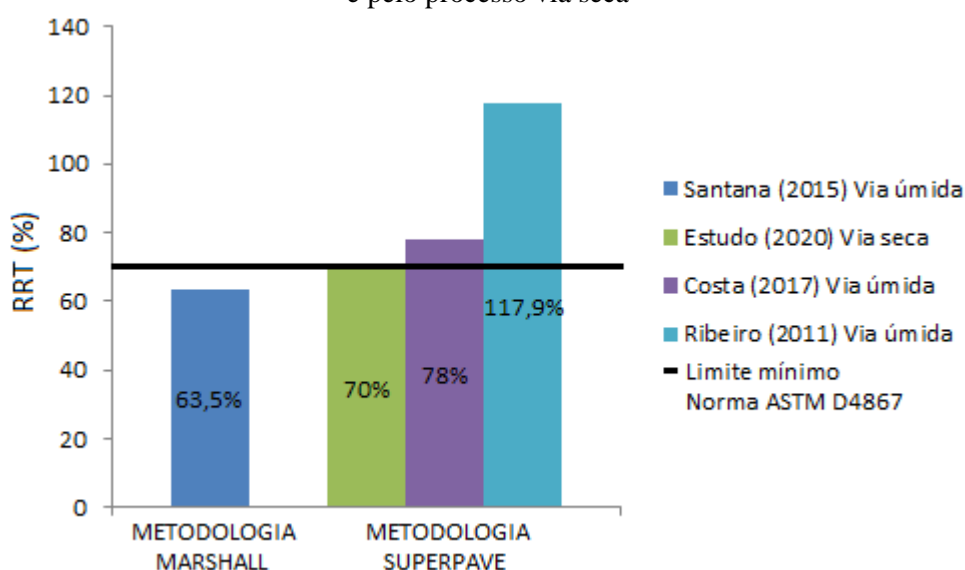
No estudo de Santana (2015) pelo processo de via úmida ao modificar o CAP 50/70 com resíduo industrial M1 nos dois tipos de dosagem, houve uma diminuição do módulo de resiliência quando comparado ao CAP puro. Resultados semelhantes de módulo de resiliência ocorreram nas pesquisas de Dias (2005) e Monn e Salini (2000), ao modificarem o ligante com borracha de pneus pelo processo de via seca, os valores de módulo de resiliência diminuíram quando comparados às misturas asfálticas com ligante puro sem adição de borracha de pneus.

Segundo Bernucci et al. (2006), os valores de módulo de resiliência podem ser considerados na faixa de 2000 a 8000 MPa para misturas asfálticas, sendo que valores menores de módulo de resiliência correspondem a misturas asfálticas modificadas por polímeros ou borracha. Valores maiores, ou seja, próximos a 8000 MPa as misturas asfálticas são consideradas duras. De acordo com Preussler (1983) quanto menor for o valor de módulo de resiliência, as misturas são mais flexíveis e valores de módulo de resiliência muito altos representam misturas muito rígidas, misturas frágeis. Portanto os valores de módulo de resiliência das misturas asfálticas com ligante modificado pelo processo via seca com resíduo industrial M1 estão dentro do limite mínimo recomendado em norma do DNIT 135/2010.

***Lottman – Dano por umidade induzida***

Na Figura 35 apresentam a razão de resistência à tração das misturas condicionadas e não condicionadas (RRT) pelo processo de via seca e via úmida. A mistura asfáltica modificada com resíduo industrial M1 por via úmida de Santana (2015) no método Marshall obteve RRT de 63,5%, valor próximo ao limite mínimo recomendado na norma ASTM D5867. Santana (2015) não realizou o ensaio de dano por umidade induzida para corpos de prova dosados pelo método Superpave, apenas para método Marshall.

Figura 35 - Resultados de RRT de misturas asfálticas com ligante modificado pelo processo via úmida e pelo processo via seca



O ensaio de dano por umidade induzida está relacionado à adesividade ligante e agregado. Segundo Freitas (2010) e a norma AASHTO T 283/89, os valores de referência são de RRT maior ou igual a 70%. Os resultados de RRT maior ou igual a 80% não são misturas classificadas como suscetíveis ao dano por umidade (FURLAN, 2006). Portanto, os resultados mostram que apenas a mistura asfáltica com ligante modificado com M1 pelo processo via úmida de Santana (2015) obteve apenas um valor próximo do limite mínimo recomendado na norma ASTM D4867. O autor atribuiu esse valor a algum erro cometido durante o procedimento do ensaio.

Já a mistura asfáltica modificada com resíduo industrial M1 pelo processo via seca conseguiu atingir o limite mínimo de RRT recomendado em norma. Todas as outras misturas asfálticas com ligante modificado atingiram o limite mínimo recomendado em norma, ou seja, não são suscetíveis ao dano por umidade induzida. Resultado análogo ocorreu na pesquisa de

Carvalho (2018) que modificou o CAP 50/70 com polímero reativo/ não reativo associado ao ácido polifosfórico pelo processo de via úmida na dosagem Superpave e obteve resultados positivos para todas as misturas asfálticas com ligante modificado.

## 5 CONCLUSÕES

Conforme a revisão bibliográfica e dos resultados aqui apresentados e discutidos pode-se concluir que:

- Definido os teores de ligante de projeto para a dosagem Marshall e Superpave do CAUQ modificado pelo processo de via seca, os resultados mostraram valores semelhantes de 6,07% para dosagem Marshall e 5,5% para dosagem Superpave, quando comparados aos teores da mistura modificada pelo processo de via úmida de Santana (2015) de 6,08% para dosagem Marshall e 5,7% para dosagem Superpave.
- Quanto à resistência à tração do ligante modificado pelo processo seco, a dosagem Marshall apresentou melhor comportamento mecânico com valor de 1,04 MPa, quando comparado à mistura asfáltica modificada pelo processo úmido, que alcançou 0,95 MPa. Porém, na dosagem Superpave, o processo por via úmida de Santana (2015) apresentou resultado superior, de 1,13 MPa quando comparado ao processo via seca com valor de 0,93MPa.
- O módulo de resiliência que apresentou melhor desempenho foi o da mistura asfáltica modificada pelo processo de via seca, através da dosagem Superpave de 4679,5 MPa.
- Para o dano por umidade induzida, apenas a mistura modificada pelo processo via seca através da dosagem Superpave atingiu o limite mínimo de 70 % recomendado em norma.
- Todas as misturas modificadas por via seca apresentaram resultados satisfatórios quanto aos limites mínimos recomendados nas normas técnicas e concordaram com resultados encontrados na literatura para ligantes modificados com outros modificantes como polímero e borracha.

Esses resultados são indicadores que é viável adotar o processo por via seca para modificação do ligante asfáltico, como também é viável sua aplicação em revestimento asfálticos tipo CAUQ, já que todos os ensaios mecânicos realizados neste estudo atingiram o limite mínimo recomendado em normas técnicas. O processo por via seca não aquece o CAP na modificação do ligante, dessa forma evita o envelhecimento por reaquecimento. Como a execução é realizada em uma única etapa, há um melhor controle da temperatura e uma maior praticidade, pois os agentes modificadores são incorporados como agregados na mistura

asfáltica. Além disso, o processo por via seca pode superar problemas de instabilidade de separação de fases do ligante durante o processo de estocagem, fato que ocorre com frequência no processo por via úmida.

## SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Para ampliar o conhecimento sobre a modificação do CAP pelo processo de via seca, sugere-se para pesquisas futuras:

- Analisar o dano por umidade induzida por outras normas técnicas.
- Avaliar o comportamento mecânico das misturas através do ensaio de fadiga.
- Investigar a resistência quanto à deformação permanente.
- Realizar a análise química dos resíduos de borra oleosa e borracha de pneus.



## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT. NBR 10004 - **Resíduos sólidos – classificação**. Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2004.

ABNT. NBR 9935 – **Agregados – Terminologia**. Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2005.

ABREU, M.; C.; S.; MAGALHÃES, L. C.; GURGEL, C.; J.; H. - Gerenciamento de resíduos sólidos perigosos: uma avaliação da gestão ambiental da borra oleosa na Petrobras/Lubnor. **Produto e Produção**. 2012, 13 (3): 75-93.

ARRIETA, V.; S.; MAQUILÓN, J.; E.; C. - Resistance to degradation or cohesion loss in Cantabro test on specimens of porous asphalt friction courses. **Procedia - Social and Behavioral Sciences**. 2014, 162: 290 – 299.

ANTONA, D. M. G.; FROTA, C.A.D.; Estudo de Misturas Asfálticas com Ligante Modificado pelo Polímero EVA para Pavimentos Urbanos de Manaus – AM. **Polímeros**, vol. 21, nº 1, p. 13-18, 2011.

ASTM D 4768 – **Standard Test Method for Bulk Specific Gravity and Density of Non – Absorptive Compacted Bituminous Mixtures**. Philadelphia, 2000b.

BALBO, J.T – **Pavimentação asfáltica – materiais, projeto e restauração**. São Paulo: Oficina de textos, 2007.

BASTOS, J.; B.; S.; BORGES, R.; L.; SOARES, J.; B.; KLINSKY, L.; M.; G. - Avaliação em laboratório e em campo da deformação permanente de pavimentos asfálticos do Ceará e de São Paulo. **Transporte**. 2015, 23(2): 44-55, doi: 10.14295/transportes. v23i3.914.

BARDINI, V.S.S.; KLINSKY, L.M.G.; JUNIOR, J.L.F. – A importância do fíler para o bom desempenho de misturas asfálticas. **Revista Minerva**. 2010, 7(1): 71-78.

BEHNOOD, A.; GHAREHVERAN, M. M. - Morphology, rheology, and physical properties of polymer-modified asphalt binders. **European Polymer Journal**. 2018; <https://doi.org/10.1016/j.eurpolymj.2018.10.049>.

BEHONED, A.; AMERI, M. M. - Experimental investigation of stone matrix asphalt mixtures containing steel slag. **Scientia Iranica**. 2012; 19 (5), 1214–1219.

BEHONED, A.; AMERI, M. M. - Morphology, rheology, and physical properties of polymer-modified asphalt binders. **European Polymer Journal**. 2018; doi.org/10.1016/j.eurpolymj.2018.10.049.

BERNUCCI, L. B.; MOTTA, L. M. G.; CERATTI, J. A. P.; SOARES, J. B. - **Pavimentação asfáltica: formação básica para engenheiros**. Rio de Janeiro, PETROBRAS, ADEBA, 2006.

BERTOLLO, S., A. M. **Avaliação laboratorial de misturas asfálticas densas modificadas com borracha reciclada de pneus**. 2002. 198f. Tese (Doutorado em Engenharia de Transportes) – Escola de Engenharia de São Carlos, São Carlos, 2002.

BOCK, A.; L.; HARTMANN, D.; BUDNY, J.; SPETCHT, L.; P.; CERATTI, P. - Estudo laboratorial sobre os efeitos de diferentes formas de adição de cal a concreto asfáltico. **Teoria e Prática na Engenharia Civil**. 2009, 14: 59-69.

BUTT, T.E.; LOCKLEY, E.; ODUYEMI, K.O.K. Risk assessment of landfill disposal sites – State of the art. **Waste Management Journal**, n.28, 2008. p.952-964.

CAO, WEIDONG. - Study on properties of recycled tire rubber modified asphalt mixtures using dry process. **Construction and Building Materials**. 2007, 21: 1011-1015.

CARVALHO, M.A.R. – **Estudo das propriedades mecânicas de misturas asfálticas com CAP 50/70 modificado por polímero reativo/ não reativo e ácido polifosfórico**. Dissertação de Mestrado em Engenharia, Universidade Federal de Campina Grande. Campina Grande, 2018.

CASTELO BRANCO, V. T. F. Caracterização de misturas asfálticas com uso de escória de aciaria como agregado. Dissertação de mestrado em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2004.

CHEN, Z.; WU, S.; WEN, J.; ZHAO, M.; YI, M.; WAN, J. - Utilization of gneiss coarse aggregate and steel slag fine aggregate in asphalt mixture. **Construction and Building Materials**. 2015, 93: 911–918.

Chung, K.-H., and Hong, Y.-K. \_1999\_. “Introductory behavior of rubber concrete.” J. Appl. Polym. Sci., 72, 35–40.

CRUZ, G. K. A. **Influencia das propriedades morfológicas e dos métodos de seleção granulométrica nas propriedades mecânicas das misturas asfálticas**. Dissertação de Mestrado em Engenharia, Universidade Federal de Campina Grande. Campina Grande, 2018.

CONAMA – CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE. Resolução CONAMA n° 416, de 30 de set. 2009. Estabelece as sobre a prevenção à degradação ambiental causada por pneus inservíveis e sua destinação ambientalmente adequada, e dá outras providências.

CUNHA, B.M.; GOUVEIA, T.L.; JUNIOR, J.L.F.; MOTTA, L.M.G.; Influência dos agregados sobre propriedades mecânicas e volumétricas de misturas asfálticas: análise do método bailey. **Anpet**, 2014.

DIAS, M. R.; **Utilização de mistura asfáltica com borracha pelo processo via seca execução de um trecho experimental urbano em Porto Alegre – RS**. Dissertação de Mestrado em Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2005.

DING, X.; MA, T.; ZHANG, W.; ZHANG, D. - Experimental study of stable crumb rubber asphalt and asphalt mixture. **Construction and Building Materials**. 2017, 157: 975–981.

DNIT 031/2006 - **Pavimentos flexíveis – Concreto asfáltico – Especificação de serviço**. DNIT - Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes, 2006, a.

DNER-ME 035/98 - **Agregados – determinação da Abrasão “Los Angeles”**. Departamento Nacional de Estradas de Rodagens, 1997.

DNER-ME 078/94 - **Agregado graúdo - adesividade a ligante betuminoso**. Departamento Nacional de Estradas de Rodagens, 1994.

DNER-ME 083/98 – **Agregados – Análise granulométrica** - Departamento Nacional de Estradas de Rodagens, 1998.

DNER-PRO 120/97 - **Coleta de amostras de agregados**. Departamento Nacional de Estradas de Rodagens, 1997.

DNER-ME 194/98 - **Agregados - determinação da massa específica de agregados miúdos por meio do frasco Chapman**. Departamento Nacional de Estradas de Rodagens, 1998

DNER-ME 195/97 - Agregados - **determinação da absorção e massa específica de agregado graúdo**. Departamento Nacional de Estradas de Rodagens, 1997.

DNER-PRO 199/96 - **Redução de amostras de campo de agregados para ensaio de laboratório**. Departamento Nacional de Estradas de Rodagens, 1996.

DNER-ME 383/99 – **Desgaste por abrasão de misturas betuminosas com asfalto polímero – ensaio Cântabro**. Departamento Nacional de Estradas de Rodagens, 1999.

DNIT - Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. Manual de Pavimentação, 2006.

DNIT ME 043/1995 – Misturas betuminosas a quente – ensaio Marshall. Departamento Nacional de Estradas de Rodagens, 1995.

DNIT-ME 131/2010 - **Materiais asfálticos - Determinação do ponto de amolecimento - método do anel e bola**. DNIT - Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes, 2010.

DNIT-ME 135/2010 – **Misturas asfálticas – Determinação do módulo de resiliência**. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes, 2010.

DNIT-ME 136/2010 – **Misturas asfálticas – Determinação da resistência à tração por compressão diametral**. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes, 2010.

DNIT - ME 155/2010 - **Material asfáltico – Determinação da penetração – Método de ensaio**. DNIT - Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes, 2010.

DNIT – TER 005/2003 – **Defeitos nos pavimentos flexíveis e semi-rígidos** – Terminologia. Rio de Janeiro, 2003.

FARIAS, R.S. Uso de borra oleosa e borracha de pneus inservíveis na modificação de ligante asfáltico de petróleo CAP 50/70. In: 11º CONGRESSO BRASILEIRO DE POLÍMEROS, Anais do 11º Congresso Brasileiro de Polímeros. Campos do Jordão, 2011.

FERNANDES, P. R. N.; ALENCAR, A. E. V.; SOARES, E. J. B.; CAVALCANTE R. M.; NASCIMENTO, R. F.; SOARES, S. A.; CASAGRANDE, M. D. T. - Estudo comparativo das propriedades químicas do resíduo borra oleosa asfáltica e do ligante asfáltico de petróleo. **HOLOS**. 2013, 29(4): 45-58.

FREIRE, R. A.; BRANCO, V. T. F. C.; VASCONCELOS, K. L. - Avaliação da resistência ao trincamento de misturas asfálticas compostas por agregados miúdos com diferentes tamanhos máximos nominais. **Transporte**. 2014, 22(3): 117-127, doi: 10.14295/transportes.v22i3.791.

FREITAS, R. D. – **Efeitos da adição de resíduos de gesso da indústria da construção civil nas propriedades mecânicas do concreto asfáltico usinado a quente**. Dissertação de Mestrado em Engenharia, Universidade Federal de Campina Grande. Campina Grande, 2010.

FURLAN, A. P. Considerações acerca da adesão e da susceptibilidade à umidade de misturas asfálticas densas à luz de algumas propriedades mecânicas. Tese de Doutorado em Engenharia Civil, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. São Carlos, 2006.

GRAÇA, D. C. S.; CAVALCANTE, E. H.; CARDOSO, G. - Avaliação da estabilidade de estocagem de ligante asfáltico modificado com blenda de borra oleosa de petróleo e borracha de pneus. **Scientia Plena**. 2015, 11(11).

GRAÇA, D. C. S.; CARDOSO, G; CAVALCANTE, E. H. - Dosagem de mistura asfáltica com CAP 50/70 modificado com borra de petróleo. **Scientia Plena**. 2016, 29(1): 127 - 130.

HASSAN, A.N.; AIREY, G.; JAYA, P.R.; MASHROS, N.; AZIZ, A.; M. - A Review of Crumb Rubber Modification in Dry Mixed Rubberised Asphalt Mixtures. **Jurnal Teknologi**. 2014, 70:4; 127–134.

HU, G.; LI, J.; ZENG, G. - Recent development in the treatment of oily sludge from petroleum industry: A review. **Journal of Hazardous Materials**. 2013; 261: 470–490, doi: 10.1016/j.jhazmat.2013.07.069.

HUANG, Y.H. – **Pavement Analysis and Desing**. 2 ed. Upper Saddle River: Pearson Education, 2004.

JASMINE, J.; MUKHERJI, S.; - Characterization of oily sludge from a refinery and biodegradability assessment using various hydrocarbon degrading strains and reconstituted

consortia. **Journal of Environmental Management**. 2015, 149, 118:125, doi: 10.1016/j.jenvman.2014.10.007.

JITSANGIAN, P.; CHINDAPRASIRT, P.; NIKRAZ, H. - An evaluation of the suitability of SUPERPAVE and Marshall asphalt mix designs as they relate to Thailand's climatic conditions. **Construction and Building Materials**. 2013, 40: 961–970.

LIU, H.; CHEN, Z.; WANG, W.; WANG, H.; HAO, P. - Investigation of the rheological modification mechanism of crumb rubber modified asphalt (CRMA) containing TOR additive. **Construction and Building Materials**. 2014; 67: 225–233, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2013.11.031.

KALANTAR, Z.; N.; KARIM, M.; R.; MAHREZ, A. - A review of using waste and virgin polymer in pavement. **Construction and Building Materials**. 2012, 33: 55–61.

KANDHAL, P.; S. – Waste Materials in Hot Mix Asphalt – An Overview. **National Center for Asphalt Technology**. 1992, 92:6.

LEITE, L. F. M. Estudo de Preparo e Caracterização de Asfaltos Modificados por Polímeros. Tese de Doutorado. Universidade Federal do Rio de Janeiro, UFRJ. 1999.

LIU, S.; CAO, W.; LI, X.; LI, Z.; SUN, C. - Principle analysis of mix design and performance evaluation on Superpave mixture modified with Buton rock asphalt. **Construction and Building Materials**. 2018, 176: 549–555.

LIMA, A. T. **Caracterização Mecânica de Misturas Asfálticas Recicladas a Quente**. Dissertação de Mestrado, Programa de Mestrado em Engenharia de Transportes, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, CE, Brasil, 2003.

MENDES, L. O.; MARQUES, G. L. O. Avaliação da influência do Método Bailey no processo de dosagem e desempenho de misturas asfálticas. **Transporte**. 2012, v. 20, n. 4, p. 35–43.

MOMM, L.; SALINI, R. Study of Recycled Tyre Rubber in Asphalt Concrete Mixtures. **Proceedings of the Asphalt Rubber 2000**, 341-357.

MOTTA, R. S. **Estudo de misturas asfálticas mornas em revestimentos de pavimentos para a redução de emissão de poluentes e consumo energético**. 2011. 229 p. Tese (Doutorado em Engenharia de Transporte) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (EPUSP). São Paulo, SP.

MOTTA, R. S.; BERNUCCI, L. L. B.; FARIA, V. C.; SOUZA, D. R.; LEAL, J. F. **Estudo de mistura asfáltica morna como revestimento de pavimento: Aplicação na Rodovia Presidente Dutra**. In: 7º Congresso Brasileiro de Rodovias e Concessões, 2011, Foz do Iguaçu. 3º Salão de Inovação ABCR, 2011.

MÚNERA, J. C; OSSA, E. A. - Estudio de mezclas binarias asfalto - Polímero. **Rev. Fac. Ing. Univ. Antioquia**, 2014; 77: 18 - 33.

NETTO, Q. M. P. REIS, A.C.C. Análise do comportamento mecânico de mistura asfalto-borracha produzidas pelo processo úmido e seco. XXIX Congresso Nacional de Pesquisa de Transporte da Anpet. ANPET, 2015.

NGUYEN, H.; T.; TRAN, T.; N. - Effects of crumb rubber content and curing time on the properties of asphalt concrete and stone mastic asphalt using dry process. **International Journal of Pavement Research and Technology**. 2018, 11: 236 – 244.

ODA, S. **Análise da viabilidade técnica da utilização do ligante asfalto-borracha em obras de pavimentação**. Tese de Doutorado, São Carlos, SP: Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 251p, 2000.

ONOFRE, F.; C.; BRANCO, V.; T.; F.; C.; SOARES, J.; B.; FAXINA, A.; L. - Avaliação do efeito de ligantes asfálticos modificados na resistência à deformação permanente de misturas asfálticas densas. **Transporte**. 2013, 21(3): 14-21, doi: 10.4237/transportes.v21i3.685.

PINHEIRO, J. H. M. Incorporação de borracha de pneu em misturas asfálticas de diferentes granulometrias (Processos úmido e seco). Dissertação de Mestrado em Engenharia, Universidade Federal do Ceará. Ceará, 2004.

PINTO, S.; PREUSSLER, E. S. **Pavimentação Rodoviária – Conceitos fundamentais sobre pavimentos flexíveis**. Rio de Janeiro: Editora Copiart, 2002.

PINTO, S.; PINTO, I.; E. – **Pavimentação asfáltica conceitos fundamentais sobre materiais e revestimentos flexíveis**. Rio de Janeiro: LTC, 2018.

POLACCO, G.; STASTNA, J.; BIONDE, D.; ZANZOTTO, L. - Relation between polymer architecture and nonlinear viscoelastic behavior of modified asphalts. **Elsevier**. 2006; 11; 230–245.

PRESTI, L.; D. - Recycled Tyre Rubber Modified Bitumens for road asphalt mixtures: Aliterature review. **Construction and Building Materials**. 2013; 49: 863–881.

PREUSSLER, E.S. **Estudo da deformação resiliente de pavimentos flexíveis e aplicação ao projeto de camadas de esforço**. Tese de doutorado. Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 1983.

SALES, P. M.; **Avaliação das características físicas e mecânicas de misturas asfálticas modificadas com adição de CCBIt**. Dissertação de Mestrado em Engenharia, Universidade Federal de Campina Grande. Campina Grande, 2015.

SAINTON, A. Advantages of asphalt rubber binder of porous asphalt concrete. **Transportation Research Record**. 1990, 1265, 69-86.

SANTAGATA, F.; A.; CANSTRARI, F.; PASQUINI, E. – Mechanical Characterization of Asphalt Rubber – **Wet Process**. 4° **International Siiv Congress**. 2007, 12:14.

SANTANA, R.R.; SANTOS, R.; CAVALCANTE, E.H.; CARDOSO, G. - Estabilidade e adesividade de ligante asfalto modificado com blenda de borra oleosa de petróleo com borracha de pneu. **Revista Matéria**. 2018, 23(1): 517-7076.

SANTANA, R.R. – **Estudo da estabilidade de estocagem do CAP 50/70 modificado com resíduo industrial e avaliação da sua influência em mistura do tipo CBUQ dosadas pelo método Marshall e Superpave**. Dissertação de Mestrado em Engenharia, Universidade Federal de Sergipe. São Cristovão, 2015.

SANTOS, K. P.; LUCENA, A. E. F. L.; LUCENA, L. C. F. L.; SILVA, J. A. A.; COSTA, S. C. F. E. - Estudo da incorporação de argilas montmorilonitas em cimentos asfálticos de petróleo. **Revista Matéria**. 2015; 20(02): 501-513.



SHEN, J.; LI, B.; XIE, Z.- Interaction between crumb rubber modifier (CRM) and asphalt binder in dry process. **Construction and Building Materials**. 2017; 149: 202–206.

SILVA, R. G. O. Estudo laboratorial do desempenho mecânico de misturas asfálticas com resíduos industriais de minério de ferro. Dissertação de Mestrado em Engenharia, Escola de Minas. UFOP, Ouro Preto. 2010.

SILVA, DA SILVA.; BENTA, A.; SANTOS, L.P. – Misturas Betuminosas com partículas ultrafinas de borracha adicionadas por via seca. 8º Congresso Luso-Mocambicano de Engenharia. 2017; REF.: 6586.

SIQUEIRA, A. A; TEIXEIRA, D. L.; MORAIS, K. S; RANGEL, M. P. – O uso da camada porosa de atrito em aeroportos. **Revista Interdisciplinar do Pensamento Científico**. 2017, 3, doi: 10.20951/2446-6778/v3n2a11.

SUN, D.; YU, F.; LI, L.; LIN, T.; ZHU, X. - Effect of chemical composition and structure of asphalt binders on self-healing. **Construction and Building Materials**. 2017; 133: 495–501.

TAHA, M.M.R.; A. S. El-Dieb.; M. A. Abd El-Wahab; M. E. Abdel-Hameed. Mechanical, Fracture, and Microstructural Investigations of Rubber Concrete. **Journal of Materails in Civil Engineering**. 2008.

TAPKIN, S.; ÇEVIC, A.; USAR, U. Prediction of Marshall test results for polypropylene modified dense bituminous mixtures using neural networks. **Elsevier**. 2010; 37: 4660–4670.

WANG, S.; CHENG, D.; XIAO, F. - Recent developments in the application of chemical approaches to rubberized asphalt. **Construction and Building Materials**. 2017; 131: 101–113.

WANG, R.; ZHAO, Z.; YIN, Q.; XIANG, Y.; WANG, Z. - Additive adsorption behavior of sludge and its influence on the slurring ability of coal–sludge–slurry and petroleum coke–sludge–slurry. **Applied Thermal Engineering**. 2018; 128: 1555-1564, doi: 10.1016/j.applthermaleng.2017.09.133

WASHINGTON, D.; C. - Recycled Tire Rubber in Asphalt Pavements. **Transportation Research Record**. 1992, 139.

WESSENLING. D. H. – Estudo do comportamento mecânico de misturas em concreto asfáltico com incorporação de resíduos industriais. Dissertação de Mestrado em Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2005.

YU, H.; LENG, L.; GAO, Z. - Thermal analysis on the component interaction of asphalt binders modified with crumb rubber and warm mix additives. **Construction and Building Materials**. 2016; 125: 168-174, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2016.08.032.

## APÊNDICE

Tabela 11 - Valores de estabilidade Marshall das misturas asfálticas com CAP 50/70 modificado com M1 pelo processo via seca

	Tipo de ligante	Teor de ligante (%)	E. M. (kgf)	E. M. médio (kgf)	Desvio padrão
Marshall	CAP M1N1	6,1	824,01	824,07	1,02
			825,11		
			823,08		
Superpave	CAP M1N1	5,7	473,09	500,77	35,41
			540,68		
			488,54		

Tabela 12 - Valores de RTCD das misturas asfálticas com CAP 50/70 modificado com M1 pelo processo via seca

	Tipo de ligante	Teor de ligante (%)	RTCD (MPa)	RTCD médio (MPa)	Desvio médio (MPa)
Marshall	CAP M1N1	6,1	1,11	1,04	0,08
			0,96		
			1,07		
Superpave	CAP M1N1	5,7	0,90	0,93	0,03
			0,95		
			0,94		

Tabela 13 - Valores de MR das misturas asfálticas com CAP 50/70 modificado com M1 pelo processo via seca

	Tipo de ligante	Teor de ligante (%)	MR (MPa)	MR médio (MPa)	Desvio padrão (MPa)
Marshall	CAP M1N1	6,1	4333	4352,01	19,52
			4351		
			4372		
Superpave	CAP M1N1	5,7	4675	4675,4	2,52
			4673		
			4678		